

**APLICACIÓN DE GEOESTADÍSTICA COMO METODOLOGÍA PARA LA
ESTIMACIÓN DE RECURSOS DE UN YACIMIENTO SEDIMENTARIO
(MINAS PAZDELRIO S.A.)**

SARA LORENA PÉREZ RIAÑO



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
SOGAMOSO
2016**

**APLICACIÓN DE GEOESTADÍSTICA COMO METODOLOGÍA PARA LA
ESTIMACIÓN DE RECURSOS DE UN YACIMIENTO SEDIMENTARIO
(MINAS PAZDELRIO S.A.)**

SARA LORENA PEREZ RIAÑO

**Práctica empresarial como modalidad de grado para la obtención del
título de Ingeniera Geóloga.**

**Director de la Práctica:
Geóloga MSc. Svitlana Nosach**

**Codirector de la Práctica:
Jorge Oswaldo Moreno Díaz**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
SOGAMOSO
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Sogamoso, 28 de abril 2016

DEDICADO A

A Dios quien fue luz y guía en cada momento de dificultad e indecisión.

A mi madre Miriam Riaño que con su dedicación, esfuerzo, comprensión apoyo y su incansable amor de madre me reconfortó en cada momento para seguir adelante y llegar a lograr cada una de las metas propuestas.

A mis abuelitos Sara Pineda y Feliciano Riaño a quienes les debo mi infancia que con su apoyo incondicional, sus consejos, amor y cuidados me dieron las herramientas para no dejar los sueños,

A mi familia los cuales día tras día compartieron junto a mí este camino.

AGRADECIMIENTOS

Infinitas gracias a mi madre y a mis abuelos quienes con su esfuerzo y apoyo he logrado llegar hasta aquí y me impulsan a seguir con nuevos proyectos.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Geológica UPTC, quienes, con su conocimiento en las diferentes áreas, lograron transmitir una visión integral de la carrera, permitiéndome proyectar en un ambiente académico y laboral

Al ingeniero Jorge Oswaldo Moreno Siendo una persona de ejemplo, me dio la oportunidad de hacer parte de su equipo de trabajo, permitiéndome demostrar mis capacidades como ingeniera geóloga, de mejorar y de aprender diariamente

Al ingeniero Héctor David Becerra que con paciencia y dedicación fue mi tutor, transmitiendo parte de su conocimiento, experiencia y destreza fue un gran apoyo para el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros Yovanny Castro, Diego Niño y Carolina Montaña que con su colaboración, consejos y compañerismo permitieron hacer de esta práctica una gran experiencia.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1 OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 JUSTIFICACIÓN	17
3 GENERALIDADES	19
3.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO	19
3.2 HIDROGRAFÍA	19
3.3 CLIMA Y VEGETACIÓN	20
3.3.1 Clasificación Bioclimática (Zonas De Vida)	21
3.3.2 Flora y Vegetación	21
3.4 ANTECEDENTES	22
3.4.1 Estudios Anteriores	22
4 METODOLOGÍA	23
5 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	24
5.1 GEOLOGÍA REGIONAL	24
5.1.1 Estilo Tectónico	24
5.1.2 Estilo Estratigráfico.....	25
5.1.3 Estratigrafía Regional.....	25
5.1.3.1 Formación Guaduas (Kpgg)	26
5.1.3.2 Formación Socha Superior (Pgas).....	26

	Pág.
5.1.3.3 Formación Picacho (Pgp)	26
5.1.3.4 Formación concentración (Pgc)	27
5.1.3.5 Depósitos Recientes	27
5.1.4 Estilo Estructural	28
5.2 GEOLOGÍA LOCAL	29
5.2.1 Estratigrafía Local.	30
5.2.1.1 Formación Picacho (Pgp)	30
5.2.1.2 Formación concentración (Pgc)	33
5.2.2 Tectónica.....	36
5.2.2.1 Falla de Fávita	36
5.2.2.2 Falla intermedia	36
5.2.2.3 Falla el Tambor.....	37
5.2.2.4 Sinclinal	37
6 EXPLORACIÓN GEOLÓGICA	38
6.1 GEOLOGÍA DE SUPERFICIE	38
6.1.1 Base topográfica	38
6.2 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO	39
6.2.1 Geofísica.....	39
6.2.1.1 Método magnétotelúrico (AMT)	40
6.2.1.2 Interpretación.....	40
6.2.2 Excavación de apiques	43
6.2.3 Perforaciones	44
6.3 CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA	46
6.4 ANÁLISIS DE CALIDAD QA/QC	48
6.4.1 ALPHA 1 S.A.....	49
6.4.2 Análisis de muestras QA/QC.....	51
7 ESTIMACIÓN DE RECURSOS.....	52
7.1 BASE DE DATOS Ó “GEO DATABASE” (GDB).....	52

	Pág.
7.2 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	55
7.2.1 Datos Originales.....	55
7.2.1.1 Cierre estequiométrico o Fetch.....	55
7.2.1.2 Análisis de dependencia de las variables compositadas.....	55
7.2.2 Datos Compositados	57
7.2.2.1 Regularización de las muestras.....	58
7.2.2.2 Normalización, dependencia y correlación de las variables compositadas.	58
7.3 DEFINICIÓN DE DOMINIOS E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA	63
7.3.1 Modelo Geológico	64
7.4 VARIOGRAFÍA.....	65
7.4.1 Análisis de Variables.....	65
7.4.2 Cálculo de los variogramas	66
7.4.3 Variogramas experimentales u omnidireccionales	67
7.4.4 Variogramas Directos.....	69
7.4.4.1 Validación.....	71
7.5 MODELO DE BLOQUES	71
7.5.1 Mapa de Isocalidad.....	74
7.6 ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS.....	74
7.6.1 Estimación por Kriging Ordinario.....	74
7.6.1.1 Estrategia de Estimación.....	75
7.6.1.2 Clasificación de los Recursos.....	75
7.6.1.3 Reporte de los Recursos OK.....	77
7.6.2 Estimación por vecino cercano “Nearest Neighbor”	77
7.6.2.1 Reporte de los Recursos NN.....	77
7.6.2.2 Validación Estimación Nearest Neighbour Vs. Ordinary Kriging.....	77
8 CONCLUSIONES.....	79
9 BIBLIOGRAFÍA.....	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización área de estudio.....	19
Figura 2. Principales cursos de agua en el sector.	20
Figura 3. Geología regional del Área.	25
Figura 4. Columna estratigráfica regional del área.....	28
Figura 5. Corte esquemático regional	29
Figura 6. Localización de la Formación Picacho (Pgp)	30
Figura 7. Columna estratigráfica representativa de la Formación Picacho (Pgp)...	32
Figura 8. Localización de la Formación Concentración (Pgc)	33
Figura 9. Columna estratigráfica del miembro Inferior de la Formación Concentración (Pgc).	35
Figura 10. Localización de las líneas de magnetotelúricas realizadas	39
Figura 11. Perfil del comportamiento magnético de las rocas a lo largo de la línea LMT1	41
Figura 12. Perfil geológico ajustado a lo largo de la línea LMT1	41
Figura 13. Perfil geológico ajustado a lo largo de la línea LMT2	42
Figura 14. Perfil geológico ajustado a lo largo de la línea LMT3.....	42
Figura 15. Localización de los apiques en el área de estudio.....	43
Figura 16. Localización de las perforaciones en el área de estudio.....	45
Figura 17. Correlación estratigráfica orientada N-S con registros Gamma Ray y Density.	47
Figura 18. Estructura General de la base de datos (GDB) y despliegue gráfico. ...	54
Figura 19. Resumen general de la base de datos.....	54
Figura 20. Método de definición de dominios y creación del modelo geológico:....	64
Figura 21. Variabilidad del espesor en el área de estudio.	65
Figura 22. Mapa variográfico para la variable Fe.....	68

Figura 23. Vista Isométrica del modelo de bloques, Atributo Litology. en comparación con el modelo geológico.....	73
Figura 24. Mapa de Isocalidad, Variable Fe.....	74
Figura 25. Mapa de Isocalidad, Variable SiO ₂	74
Figura 26. Categorización de los recursos.....	76

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Valores de precipitación media anual de los últimos 50 años en las estaciones cercanas al área de estudio.....	21
Gráfica 2. Gráfica de DPR para para el SiO ₂	51
Gráfica 3. Histograma del cierre estequiométrico y su registro de estadística básica.	55
Gráfica 4. Distribución de los datos para cada una de las variables más importantes en la producción del acero. Fe y SiO ₂	56
Gráfica 5. Histogramas para los datos de Al ₂ O ₃ , LOI, P ₂ O ₅ y MgO.	56
Gráfica 6. Histogramas de distribución de los datos para Fe _{total} y SiO ₂ compositados.....	58
Gráfica 7. Histogramas para las variables Al ₂ O ₃ , LOI, P ₂ O ₅ y MgO compositado.....	59
Gráfica 8. Regresión lineal entre el Fe y el SiO ₂	61
Gráfica 9. Regresión lineal entre el Fe y el SiO ₂	62
Gráfica 10. Análisis de variables de conglomerados: Fe; Fe ₂ O ₃ ; SiO ₂ ; LOI;	63
Gráfica 11. Representación gráfica de un variograma básico.....	66
Gráfica 12. Variogramas omnidireccionales Horizontal (Derecha) y Vertical (Izquierda) para Fe.	67
Gráfica 13. Variogramas omnidireccionales Horizontal (Derecha) y Vertical (Izquierda) para SiO ₂	68
Gráfica 14. Variogramas omnidireccionales AL ₂ O ₃ (Derecha) y P ₂ O ₅ (Izquierda) para SiO ₂	68
Gráfica 15. Variograma Major para el Fe. Sgems Software.....	69
Gráfica 16. Variogramas SemiMajor para el Fe. Sgems Software.....	70
Gráfica 17. Variograma Downhole para el Fe. Sgems Software.....	70
Gráfica 18. Histogramas y correlacion lineal para el método Ordinary Kriging y Vecino Cercano. (Surpac).....	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones meteorológicas cercanas.	20
Tabla 2. Líneas geofísicas realizadas	39
Tabla 3. Caracterización geológica – geofísica de las rocas exploradas.	40
Tabla 4. Esquema de muestreo general realizado para análisis geoquímico en el pozo P- 05	48
Tabla 5. Modelo de resultados geoquímicos y cierre estequiométrico.	50
Tabla 6. (Continuación) Modelo de resultados geoquímicos y cierre estequiométrico.	51
Tabla 7. Resumen estadístico para la longitud de muestreo	58
Tabla 8. Resumen estadístico de las variables compositados	60
Tabla 9. Coeficientes de correlación	61
Tabla 10. Parámetros de cálculo utilizados.	67
Tabla 11. Estructura del variograma de mayor alcance.	69
Tabla 12. Resumen modelo de Bloques	72
Tabla 13. Descripción de atributos que se asignaron a cada bloque	72
Tabla 14. Desviación entre los volúmenes del modelo geológico y el modelo de bloques.	73
Tabla 15. Estrategia de estimación.	75
Tabla 16. Criterios de Clasificación de los recursos.	75
Tabla 17. Variación del Kriging.	76
Tabla 18. Recursos minerales de Hierro.	77
Tabla 19. Recursos minerales de Hierro.	77
Tabla 20. Relación estadística entre el Nearest Neighbour y Ordinary Kriging	77

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Mapa de localización en escala 1:6.000

ANEXO B. Mapa geológico en escala 1:5.000

ANEXO C. Columna estratigráfica de la Formación Concentración en escala 1:2000

ANEXO D. Columna estratigráfica de la Formación Picacho en escala 1:2000

ANEXO E. Mapa exploratorio en escala 1:5.000

ANEXO F. Perfiles de interpretación magnetotelúrica escala 1:4000.

ANEXO G. Correlación estratigráfica

ANEXO H. Mapa de curvas isopacas en escala 1:4000

ANEXO I. Mapa de recursos en escala 1:5000

ANEXO J. Mapa de isocalidad en escala 1:5000

RESUMEN

Se realizó la exploración para la estimación de recursos dentro un yacimiento de mineral de hierro, en un sector del municipio de Sativanorte, con el fin de identificar, cuantificar y cualificar los recursos minerales existentes en el sector.

Esta exploración parte de la recopilación de información de estudios anteriores que junto con la cartografía y mapa geológico evidencian el estilo estructural de la zona, en donde, a partir de esta se estableció el planeamiento para realizar la exploración del subsuelo; se ejecutaron tres (3) líneas Magnetotélúricas, trece (13) perforaciones diamantadas con recuperación de núcleo, que cuentan con el respaldo de registros geofísicos y veintiocho (28) apiques mecanizados. Para el análisis geoquímico se analizaron 142 muestras entre techos, pisos y mineral, estos resultados se encuentran ajustados por procedimientos de control de calidad internos (QA/QC), donde los resultados obtenidos de los análisis geoquímicos mostraron un porcentaje de hierro total (Fe) entre el 42 y 50% con bajo contenido de sílice (SiO_2) definiendo así el banco de mineral de hierro.

La integración de la información obtenida durante la exploración permitió la elaboración de una base de datos sólida y junto con la interpretación de contornos estructurales se definió el modelo geológico. El análisis exploratorio de datos (EAD) comprobó un yacimiento de buena ley y junto la variografía y evidencian un yacimiento de gran continuidad espacial.

Teniendo en cuenta la aplicación de geoestadística como metodología de estimación y luego de haber poblado el modelo de bloques con diferentes atributos se decide usar como método el “*Kriging Ordinario*” en el cual dichos resultados son comparados por la técnica del “*Nearest Neighbor*” para exponer la efectividad del kriging, dicha metodología permitió la categorización y estimación de los recursos del área de estudio en medidos, indicados e inferidos.

Palabras Clave: Estimación, Geoestadística, Hierro, Modelamiento, Recursos

INTRODUCCIÓN

Minas PazdelRío S.A. es una empresa minera que se dedica a la exploración y explotación de mineral de hierro, caliza y carbón, materias primas fundamentales en la producción de acero.

Partiendo del hecho de que todas las empresas mineras buscan encontrar e implementar mejores estándares para la categorización, cualificación y cuantificación de recursos minerales, se tuvo en cuenta que la metodología aplicada en esta práctica empresarial sea para cualquier yacimiento de origen sedimentario, con el fin, de identificar la productividad del recurso mineral con potencial de explotación. Se hizo necesario buscar un yacimiento que permitiera su evaluación, cuantificación y categorización y de esta forma admitiera ser propuesto en el desarrollo de nuevas oportunidades mineras basados en la importancia del hierro en el proceso siderúrgico se tomó como caso de estudio el banco de mineral de hierro que se encuentra en la base de la secuencia estratigráfica de la Formación Concentración (Pgc) del municipio de Sativanorte,

Esta práctica empresarial busca la integración de los conocimientos adquiridos durante el pregrado, con el objetivo de realizar un proyecto en ingeniería geológica que, de forma complementaria, une aspectos como: la geología, la geofísica y la evaluación de yacimientos y sirvan además para identificar opciones de mejora en los procesos de una compañía minera con el fin de estimar recursos que se proyecten a bajo costo.

El presente informe permite visualizar la evolución por etapas de un proyecto de exploración confidencial que busca mineral de hierro, por lo que mucha información es de carácter privado y no es posible revelar tales como: localización, logueos, fotografías de perforaciones, resultados químicos, entre otros, partiendo de la consecución de información primaria y secundaria junto con la adecuación de muchos conceptos ligados a la exploración directa e indirecta, fue posible adaptar, mejorar y aprender conceptos durante este proceso que conlleva razonamiento, precisión y coherencia.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y aplicar una metodología que permita realizar la estimación y clasificación de recursos en un yacimiento sedimentario a través del uso de conceptos geoestadísticos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Recopilar información cartográfica, litológica, geofísica, geoquímica y estudios realizados.

Analizar la información recolectada de la exploración geológica del subsuelo.

Crear la base de datos ó geodatabase (GDB) consolidada.

Realizar el modelo geológico del yacimiento.

Hacer el análisis exploratorio de datos.

Definir las variables regionalizadas.

Hacer el análisis geoestadístico de variables regionalizadas.

Obtener estructuras variográficas.

Clasificar los recursos por el vecino cercano y Kriging Ordinario.

Realizar el reporte de clasificación y estimación de recursos.

2 JUSTIFICACIÓN

Esta práctica empresarial con Minas PazdelRío S.A., permitió aplicar y reforzar los conocimientos adquiridos, durante el pregrado, para desarrollar y aplicar metodologías de estimación y clasificación de recursos minerales en un yacimiento sedimentario, tomando como caso de estudio el banco de mineral de hierro presente en la base de la formación concentración (Pgc) y aplicando conceptos de geofísica, geoquímica, geoestadística y evaluación de yacimientos e integrando de manera sistemática, los resultados de la exploración geológica superficial y del subsuelo; esta información fue recopilada en un consolidado que permite plasmar y desplegar la información en software especializados de modelamiento y geoestadística para la correcta interpretación de los resultados obtenidos, permitiéndome enfocar y afianzar los conocimientos de manera acertada, con el fin de desarrollar la práctica de la mejor forma y de elaborar un reporte final que sea de interés y utilidad para la empresa dentro de una posible explotación o planeamiento minero, esta oportunidad de aprendizaje se convierte en una experiencia laboral importante y además se implementa como la herramienta concluyente para optar al título de Ingeniero Geólogo.

CONVENCIONES

Para efectos de actualización de nomenclatura estratigráfica tenemos:

- Formación Concentración Toc: Pgc
- Formación Picacho Tep: Pgp
- Formación Socha Superior Tpss: Pgas
- Formación Socha Inferior Tpsi: Pgars
- Formación Guaduas Ksg: Kpgg
- Formación Ermitaño Kse: Kpge

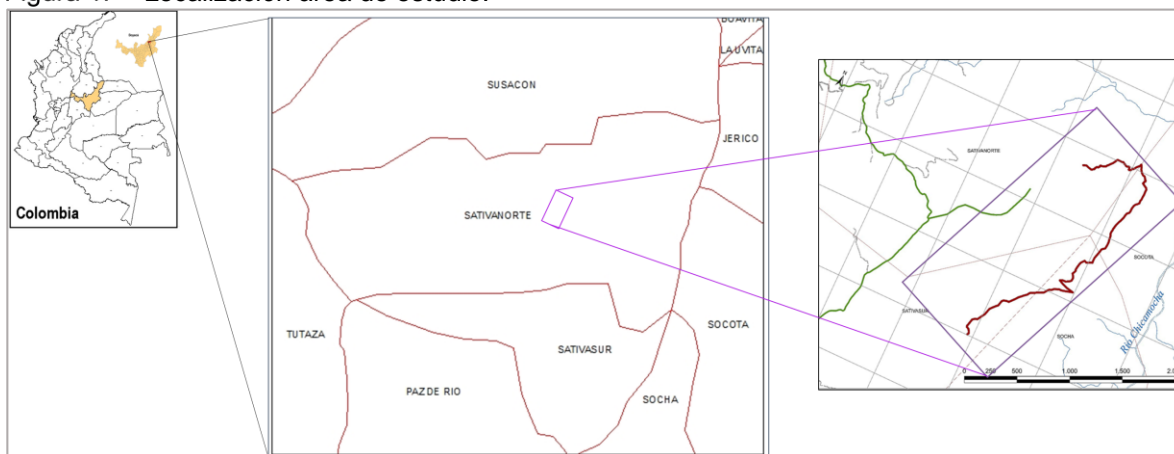
3 GENERALIDADES

3.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de exploración cuenta aproximadamente con 94.5Ha y se localiza en la Cordillera Oriental de los Andes del territorio colombiano, en el departamento de Boyacá, al margen izquierdo del Río Chicamocha en una vereda del municipio de Sativanorte, dónde aflora la serie Salitre (C1) de la Formación Concentración (Pgc).

La vía principal de acceso dista aproximadamente 89Km de la ciudad de Sogamoso; una segunda vía de acceso, aparta cerca de 78km con un promedio de dos a dos horas y media de recorrido. La Figura 1 muestra la localización del área.

Figura 1. Localización área de estudio.

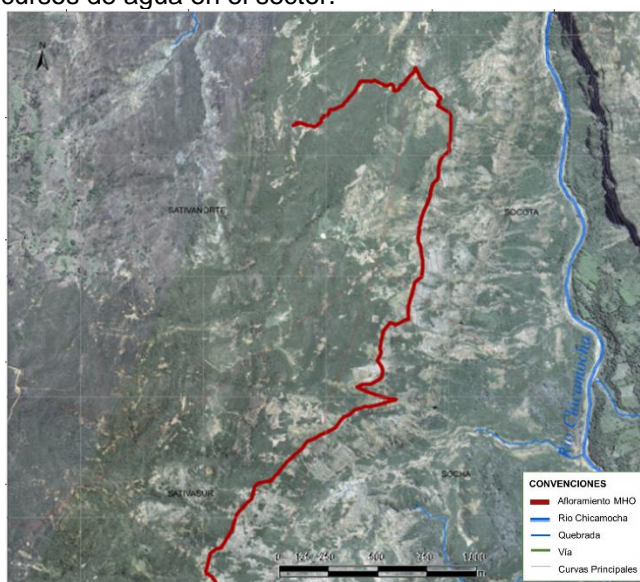


Fuente: Autor

3.2 HIDROGRAFÍA

La hidrografía del área de estudio se encuentra controlada por la cuenca del Río Chicamocha con cercanía al margen izquierdo del Río Chicamocha, que discurre en dirección NW-SE constituyendo el curso principal en la zona. A este se suman corrientes de tipo intermitente que llevan agua solo durante épocas de lluvia, la Figura 2, muestra los cursos de agua que se encuentran en el área de estudio.

Figura 2. Principales cursos de agua en el sector.



Fuente: Autor

3.3 CLIMA Y VEGETACIÓN

El área de estudio se encuentra clasificada en clima templado a cálido con rangos de altitud entre los 1700 y 2500 m.s.n.m, teniendo en cuenta que existe una correlación directa entre la distribución de las precipitaciones y su elevación junto con la cobertura vegetal, esta área dispone de una precipitación promedio anual de 917.9 mm (Ver Gráfica 1) tomados en dos estaciones cercanas al área de estudio (ver Tabla 1) y basados en la información mensual que presentan estas estaciones, se identifican dos (2) periodos de baja precipitación, menores a 50mm (Junio a Agosto y de Diciembre a Febrero) esta característica de régimen de lluvias corresponde con un régimen de lluvias Bimodal. Cabe resaltar que durante los periodos de altas precipitaciones se pueden reactivar los deslizamientos y aumentar el socavamiento en zonas de erosión severa. ¹

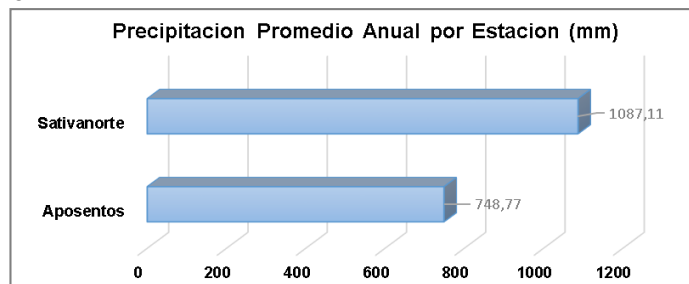
Tabla 1. Estaciones meteorológicas cercanas.

ESTACIÓN	CÓDIGO	MUNICIPIO	CORRIENTE	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)
Aposentos	2403057	Socotá	Chicamocha	1159882	1164666	2328
Sativanorte	2403018	Sativanorte	Chicamocha	1152486	1170178	2416

Fuente. IDEAM.

¹Instituto de Hidrografía, meteorología y Medio Ambiente de Colombia, Años 1986-2012.

Gráfica 1. Valores de precipitación media anual de los últimos 50 años en las estaciones cercanas al área de estudio.



Fuente: IDEAM.

3.3.1 Clasificación Bioclimática (Zonas De Vida)

Mediante el sistema de clasificación de Holdridge, que consiste en un sistema de clasificación ecológica basado en la biotemperatura anual, la precipitación total anual y la relación de evapotranspiración potencial. Clasifica el área dentro de una zona de vida de Bosque seco montano bajo (bs-MB), es decir que se presenta en altas planicies andinas y cañones poco resguardados dentro de las cordilleras, comprendiendo las regiones que se hallan en alturas que varían desde los 2.150 hasta 2800 m.s.n.m. con una temperatura que varía entre los 12 y los 17°C y una precipitación que varía entre los 600 y 900 mm al año. Dichas zonas se caracterizan por presentar una topografía abrupta representada por gran cantidad de escarpes, laderas erosionadas, onduladas y rectas.

3.3.2 Flora y Vegetación

Las principales especies localizadas en la zona se pueden clasificar en especies nativas y especies exóticas siendo las primeras las que se encuentran en menor proporción, entre estos encontramos pastos de tipo natural y rastrojo sujeto a un aprovechamiento desordenado debido al déficit de energía existente la población rural tuvo que intervenir los bosques y relictos de bosque de la región. A este problema lo acompaña la no repoblación de material, hecho que generó agotamiento del recurso. La vegetación a su vez se caracteriza por ser xerofítica, (árboles de poca altura), entre los más comunes se encuentran hayuelo, mortiño, verbena, sauce, chilco, dividivi, tuna, penco, jarilla, junca, fique motua y pastos principalmente kikuyo, trébol blanco, carretón, ciro, arrayán, eucalipto, Trupillo, Yátago, Moral, Pgcua, Caquizá, Cordoncillo, Cocuba, Espina de cabro y Uña de gato.

3.4 ANTECEDENTES

3.4.1 Estudios Anteriores

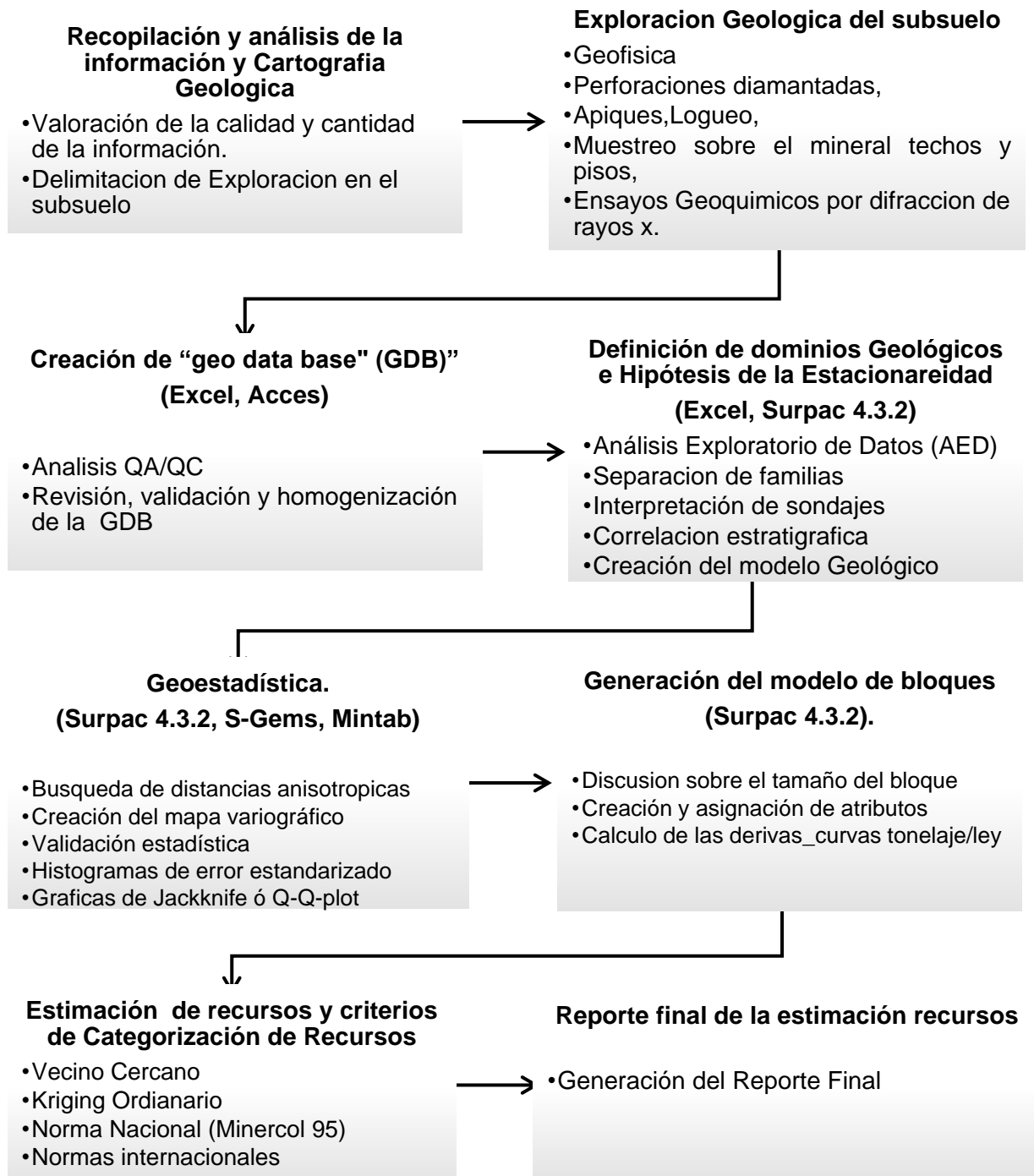
Los estudios nombrados, presentan una descripción generalizada de la zona y yacimientos análogos en el sector, con planteamientos de algunos autores, que explican el desarrollo regional del mineral de hierro, además del estado en el cual se encuentra el área explorada, la mayoría de estas investigaciones han sido favorecidas por empresas como Acerías PazdelRío S.A. con el fin de obtener materias primas para su uso industrial. Minas PazdelRío S.A. cuenta con una gran base de datos donde se puede obtener información acerca de la geología regional, estudios petrográficos, geoquímicos, imágenes aéreas, bases topográficas y operaciones mineras.

“Yacimientos de Hierro, Carbón y Caliza de Paz de Río – Boyacá”; Servicio Geológico Nacional. Alvarado B. y Sarmiento R. (1944), de este informe fue posible documentar sobre las especificaciones del yacimiento ya que realizaron el primer estudio de la región, dentro de un área de 500 km², donde se ejecutó una exploración detallada de los afloramientos en sectores en la región con yacimientos pertenecientes a la misma cuenca como son: La Mesa, El Uvo, Coloradales y El Uche.

“Geología de la región Duitama - Sogamoso – Paz del Río. Departamento de Boyacá, Belencito” Reyes I, (1965); este informe permite conocer la estratigrafía regional en el departamento de Boyacá, en la que se define la posición del banco de mineral, además de extender los estudios al sector de Paz Vieja y fijar una nueva situación estructural del banco mineral de hierro según el desarrollo tectónico de la cuenca.

4 METODOLOGÍA

Flujograma de la metodología utilizada para el desarrollo de la práctica en 8 Fases.



5 CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1 GEOLOGÍA REGIONAL

En el marco regional se encuentran en el área de estudio rocas que pertenecen a la cordillera Oriental de Colombia, donde se han caracterizado las formaciones que comprenden la secuencia estratigráfica de la cuenca Paz de Río

5.1.1 Estilo Tectónico

Geológicamente las unidades tectónicas y estructuras presentes en el área fueron formadas como resultado de varios eventos a nivel regional de la cuenca:

El período Jurásico Tardío a Cretáceo Temprano se caracterizó por procesos distensivos de bloques, permitiendo el desarrollo de grabens, en respuesta al proceso de rifting, que ocurrió durante la separación del margen noroeste del continente suramericano, con respecto al norteamericano. (Macizo de Santander; Dörr, et al., 1995)

A comienzos del Berriasiano - Valanginiano (cretáceo inferior) ocurrió la sedimentación de eventos marinos someros en dos cuencas de rift, separadas por el alto del paleomacizo de Floresta. (Hubach, E. 1957)

A partir del Cretáceo medio se manifiestan suaves perturbaciones, ligadas a la Actividad de la falla de Soapaga, la cual sufre un gran cabalgamiento. El comienzo de la sedimentación postrift se da a partir del Turoniano - Coniaciano y se mantiene hasta finales del Cretáceo Superior, cuando se da una tectónica de esfuerzos compresivos en respuesta al emplazamiento de la Cordillera Occidental. el continente suramericano, con respecto al norteamericano. (Hubach, E. 1957)

A nivel del Paleoceno Tardío hasta el Oligoceno la sedimentación fue controlada por los pulsos tectónicos del levantamiento de la Cordillera Central, generando espacio y aporte de materiales en ambientes de carácter fluvial, predominando el desarrollo de facies clásticas arenosas en las áreas cercanas al oeste de la cuenca. La interrupción de la sedimentación de la Formación Concentración en el oligoceno Superior indica el inicio de la Orogénesis Andina, que tuvo mayor actividad en el Mioceno y que prosiguió posiblemente durante todo el Plioceno. (Hubach, E. 1957)

Desde el Oligoceno Medio hasta el presente se está llevando a cabo el levantamiento de la cuenca Oriental de Colombia por lo que es posible que durante todo el Cuaternario ocurran estructuras menores, ligadas a la erosión de los plegamientos y originados por deslizamientos tectónicos, todo esto como consecuencia del rápido levantamiento de la región.

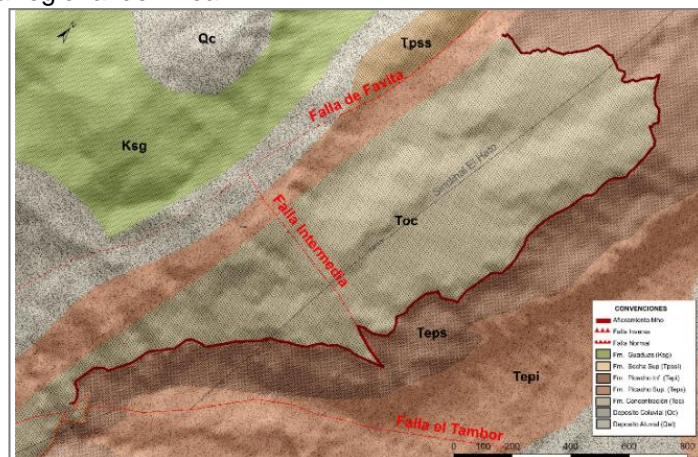
5.1.2 Estilo Estratigráfico

Las cuatro grandes discordancias presentes en la región dividen la secuencia estratigráfica en cinco conjuntos principales (Chittaro, 1984)²:

- 1 Basamento Cristalino, compuesto por rocas intrusivas de tipo granítico y rocas metamórficas como esquistos cuarcitas y filitas plegadas
- 2 Serie de Paleozoico Superior, predominada por invasión marina, se inicia en el Devónico Medio originando una serie sedimentaria que posteriormente se interrumpió por un levantamiento orogénico, que permitió el cambio en la sedimentación a lo largo del Devónico Superior, esta serie está compuesta por las formaciones del miembro Floresta (Formación Tibet (Dt) y Formación Floresta (Df)) y Cucho (Cc)
- 3 Serie Molásica Mesozoica debida a la erosión de la dorsal paleo-andina en emersión, depositó sedimentos en los periodos del Triásico-Jurásico, donde se encuentra la Formación Girón (Jg) compuesta por areniscas que alternan con arcillolitas, limolitas y conglomerados rojos (red-beds)
- 4 Serie Cretácico–Paleogeno Terciaria principalmente de invasión marina del cretácico inferior, seguida de un periodo de erosión, en esta serie se encuentran las formaciones Tibasosa (Kit), Belencito (Kib), Une (Kiu), Grupo Churuvita y Conejo (Kscn); un periodo transicional conformado por las formaciones Ermitaño (Kse) y Guaduas (Kpgg), se presenta una sedimentación netamente continental conformada por las formaciones Areniscas de socha (Pgars), arcillolitas de socha (Pgas), Picacho (Pgp) y Concentración (Pgc)
- 5 Depósitos Post- Andinos, que se depositaron luego del plegamiento Andino que dio origen la cordillera Oriental, que formaron cuencas Intermontanas rellenas por depósitos aluviales, lacustres y fluviales, terrenos glaciales y materiales Coluviales

5.1.3 Estratigrafía Regional

Figura 3. Geología regional del Área.



Fuente: Autor

² REYES ÍTALO. Geología de la Región de Duitama – Sogamoso – Paz de Río. U.P.T.C., 1984. p.6 -66

Existen varios trabajos que discuten la geología de la región destacándose los de Alvarado B. y Sarmiento R., Reyes I. y Valentino de Reyes M. T. que describen el comportamiento litológico de la siguiente manera como se observa en la Figura 3 en el ANEXO B se encuentra el mapa geológico regional a detalle.

5.1.3.1 Formación Guaduas (Kpgg)

Se denomina a si (según Alvarado B. y Sarmiento R) a la sucesión litológica que contienen los mantos de carbón explotables que afloran en la región de Guaduas, Cundinamarca. Reyes I. (1984)³ definió dos miembros: el inferior constituido por arcillolitas fisibles negruzcas, con esporádicas intercalaciones de areniscas cuarzosas blancas de grano fino a grueso en capas con espesores que oscilan entre 5 y 30 m y el superior constituido por continuas alternancias de limolitas y arcillolitas, niveles de areniscas lajosas de grano fino e intercalaciones de 7 a 10 mantos carbón, data como maestrichtiana⁴ hasta la parte media y como paleocena en la parte superior Regionalmente la formación Guaduas, se encuentra visible en las zonas de erosión en la parte occidental de la falla de Favita, En las zonas de afloramiento se pueden evidenciar los grandes esfuerzos tectónicos de ambiente estuarino.

5.1.3.2 Formación Socha Superior (Pgas)

Se define así la secuencia de estratos aflorantes al sur del pueblo de Socha Viejo comprendida entre la Formación Socha Superior y la Formación Picacho, El contacto de esta unidad litoestratigráfica con la suprayacente Formación Picacho es concordante y neto, y se ha marcado en la base de una sucesión de cuarzoarenitas de grano medio a grueso. Alvarado & Sarmiento (1944)⁵ consideran que este contacto podría ser discordante, debido al cambio de espesor que muestra la Formación Socha Superior en diferentes sectores. Según Alvarado B. y Sarmiento R. (1949) está constituida principalmente por arcillolitas de color blanco, rojizo y gris claro, en algunos sectores es frecuente encontrar hacia la base un nivel de lignito con un espesor de 40cm. Fácilmente identificable por mostrar una geomorfología suave, ligeramente redondeada propia de las formaciones arcillosas. Reyes I. (1984) la divide en tres niveles y le asigna un espesor que varía entre los 250 y 270 m.⁶

5.1.3.3 Formación Picacho (Pgp)

Según Alvarado B. y Sarmiento R. (1944)⁷ denominan así a las areniscas que forman el cerro de Picacho en el alto El Portillo al noreste del municipio de Paz de Río.. Esta formación alcanza un espesor de 345 m y está constituida principalmente por dos miembros. Su contacto inferior está dado por el contacto concordante con

³ REYES ÍTALO. Geología de la Región de Duitama – Sogamoso – Paz de Río. U.P.T.C., 1984. p.32.

⁴ Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes colombianos; Bol. Geol. Vol. VI Nos. 1-3, 1958, Bogotá.

⁵ ALVARADO B. Y SARMIENTO R. Op. cit. p.43.

⁶ REYES ÍTALO. Op. cit. p, 43.

⁷ ALVARADO B. Y SARMIENTO R. Op. cit. p.47.

las arcillolitas grises claro del techo de la Formación Socha Superior y el límite superior concordante y neto con las areniscas Ferruginosas y el banco de mineral de hierro de la base de la Formación Concentración y se marca en el techo de una sucesión de arenita de cuarzo media a gruesa. Según van der Hammen (1957)⁸, en esta unidad no se han encontrado muestras con polen; sin embargo, basado en su posición estratigráfica, considera que su edad debe ser eocena temprana.

5.1.3.4 Formación concentración (Pgc)

Se denomina así según Alvarado B. y Sarmiento R. (1944)⁹, al conjunto de arcillolitas y areniscas intercaladas; designan una sucesión de arcillolitas comúnmente yesíferas y areniscas de grano fino a grueso, con estratos de hierro oolítico en la parte inferior, que descansa sobre la Formación Picacho de manera concordante, mientras su límite superior se aprecia discordante con los depósitos fluvio-lacustres post-andinos. Reyes I. (1984) dividió la formación en dos miembros y a su vez en nueve series, de acuerdo a sus características particulares se encuentra Paloquemado (C9), Socotacito (C8), Quebraditas (C7) y Quebrada Colorada (C6). En el conjunto inferior prevalecen areniscas y zonas principalmente arcillosas, lo que permite la subdivisión en las series Paz Vieja (C5), La Loma (C4), Carraco (C3), Puerta de Golpe (C2) y Salitre (C1) siendo potencialmente de interés económico.

5.1.3.5 Depósitos Recientes

Cuaternario Coluvial (Qc) Se presentan en las laderas y sobre las principales fallas, asociados generalmente a su actividad, predominantemente bloques angulares.

Cuaternario Aluvial (Qal) hace referencia a los depósitos aluviales que se ubican hacia las márgenes de los drenajes principales y consisten de bloques redondeados a subredondeados, principalmente de arenitas, en una matriz areno arcillosa.¹⁰

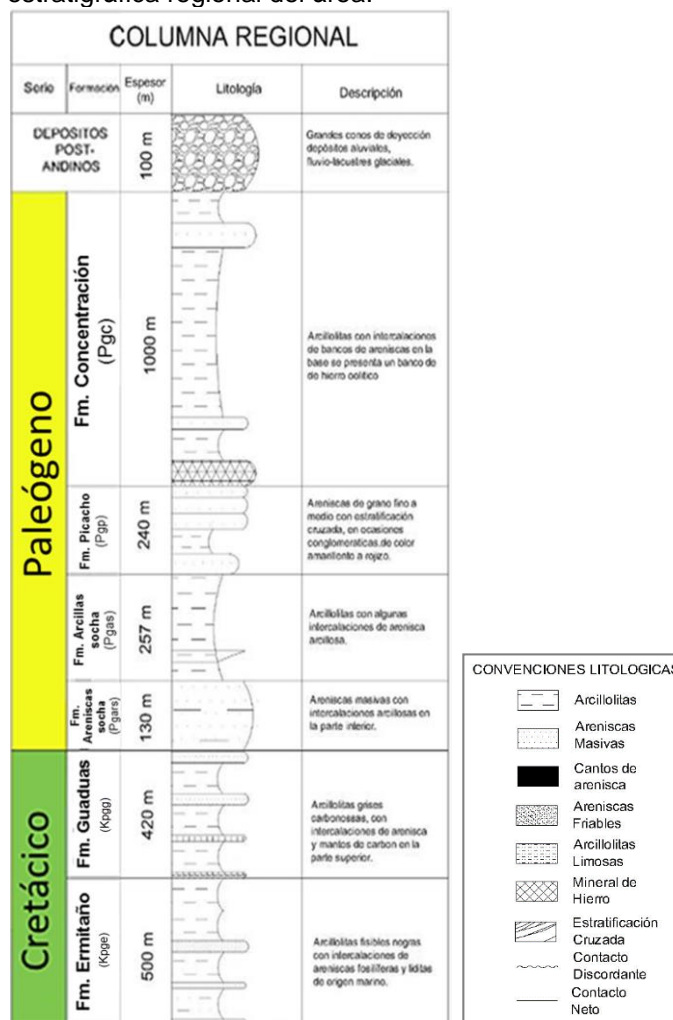
La Figura 4 expone la columna estratigráfica regional que comprende desde el cretáceo superior con la Formación Guaduas (Kpgg) hasta los depósitos post Andinos suprayacentes a la Formación Concentración (Pgc)

⁸ VAN DER HAMMENT T. Aplicación palinológico a la correlación de los mantos de carbón del yacimiento La Chapa. Bogotá: Instituto Geológico Nacional 1955 p.46.

⁹ ALVARADO B. Y SARMIENTO R. Op. Cit. p.49

¹⁰ REYES ITALO. Geología de la Región de Duitama – Sogamoso – Paz de Río. U.P.T.C., 1984. p.55-61.

Figura 4. Columna estratigráfica regional del área.



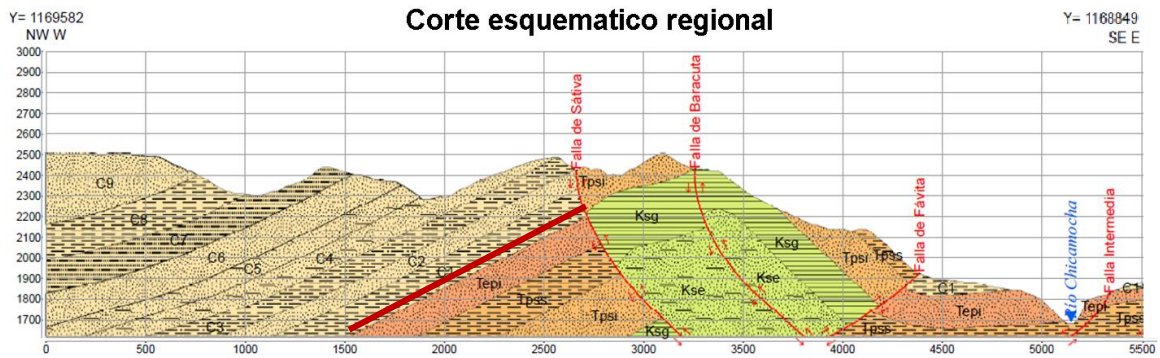
Fuente: Autor

5.1.4 Estilo Estructural

La deformación de la serie sedimentaria regional es una combinación de pliegues y fallas, pero predominantemente plegada, conserva los mayores plegamientos en orientación SW-NE, como se considera a la directriz tectónica normal de la cordillera Oriental en el departamento de Boyacá, dichos plegamientos están dislocados por fallas con orientaciones variables, las fallas inversas longitudinales acompañan los plegamientos, mientras que las fallas transversales dislocan los pliegues en sentido diagonal o perpendicular al rumbo de los ejes.¹¹ La Figura 5 esquematiza el comportamiento estructural de la región.

¹¹ RECURSOS, Estudio Técnico contrato 006-85-M, Minas PazdelRío Belencito, 2015 p. 62

Figura 5. Corte esquemático regional



Fuente: Estudio Técnico 2015 MPDR

5.2 GEOLOGÍA LOCAL

La geología en la zona norte del departamento de Boyacá ha sido estudiada en busca de recursos minerales que se encuentran en la región. El interés geológico económico de esta área se enfoca a las formaciones Concentración (Pgc) donde se encuentra sedimentado el mineral de hierro y Picacho (Pgp) que hacen parte a la secuencia estratigráfica terciaria, cabe resaltar que dicha sedimentación se dio en el límite entre el Eoceno y el Oligoceno. Las fuertes pendientes, el clima seco y su comportamiento estructural generan movimientos de material en suelos y desprendimientos de roca que dificultan la observación de los afloramientos (Ver Fotografía 1).

Fotografía 1. Evidencia de movimientos de material.



Fuente: Autor.

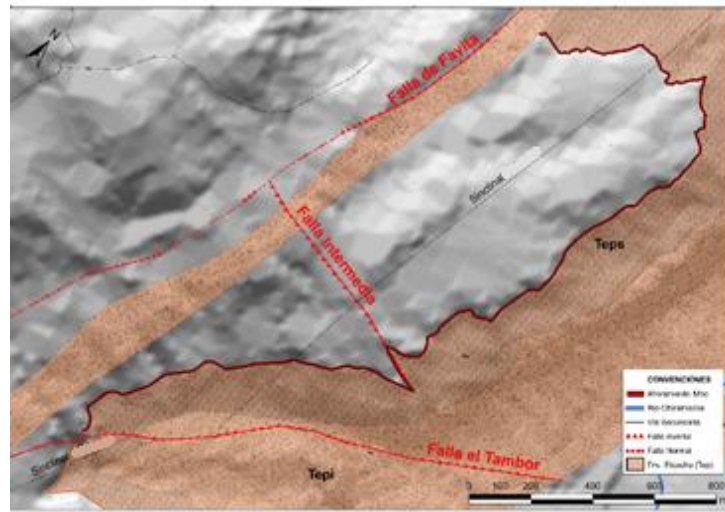
5.2.1 Estratigrafía Local.

En la zona de estudio afloran rocas que datan desde el período Cretácico hasta depósitos cuaternarios recientes, pero el interés económico se encuentra en la en el miembro superior de la formación Picacho que infrayase el banco de mineral y el Miembro C1 “serie el Salitre” de la formación Concentración en donde se encuentra sedimentado el banco de mineral de hierro.

5.2.1.1 Formación Picacho (Pgp)

En el área de estudio se encuentran bancos de areniscas de color blanco amarillentas, deleznales con un tamaño de grano que varía de fino a grueso con algunos niveles conglomeráticos con guijos de cuarzo redondeados de 1 a 5 cm de diámetro, por otra parte, se evidencian bancos de areniscas pardas de grano medio a grueso con un nivel constituido por guijarros de cuarzo en una matriz arenosa de estratificación cruzada, marcas de oleaje y buena selección. En el área se puede identificar como se observa en la Figura 6 los dos miembros exaltados por Ítalo Reyes (1967)¹² de la siguiente manera:

Figura 6. Localización de la Formación Picacho (Pgp)



Fuente: Autor.

- **Miembro Inferior (Pgpi)**

Compuesto por capas de areniscas de grano grueso, feldespáticas con frecuentes niveles de guijos de cuarzo de pocos centímetros de diámetro. Las areniscas son de grano muy variable, desde masivas a bien estratificadas. Generalmente la cementación es escasa en los horizontes de grano grueso a conglomeráticos, mientras que los niveles de grano fino presentan buena cementación. Hay

¹² REYES ITALO, Geología de la Región de Duitama – Sogamoso – Paz de Río. U.P.T.C., 1984. p.46

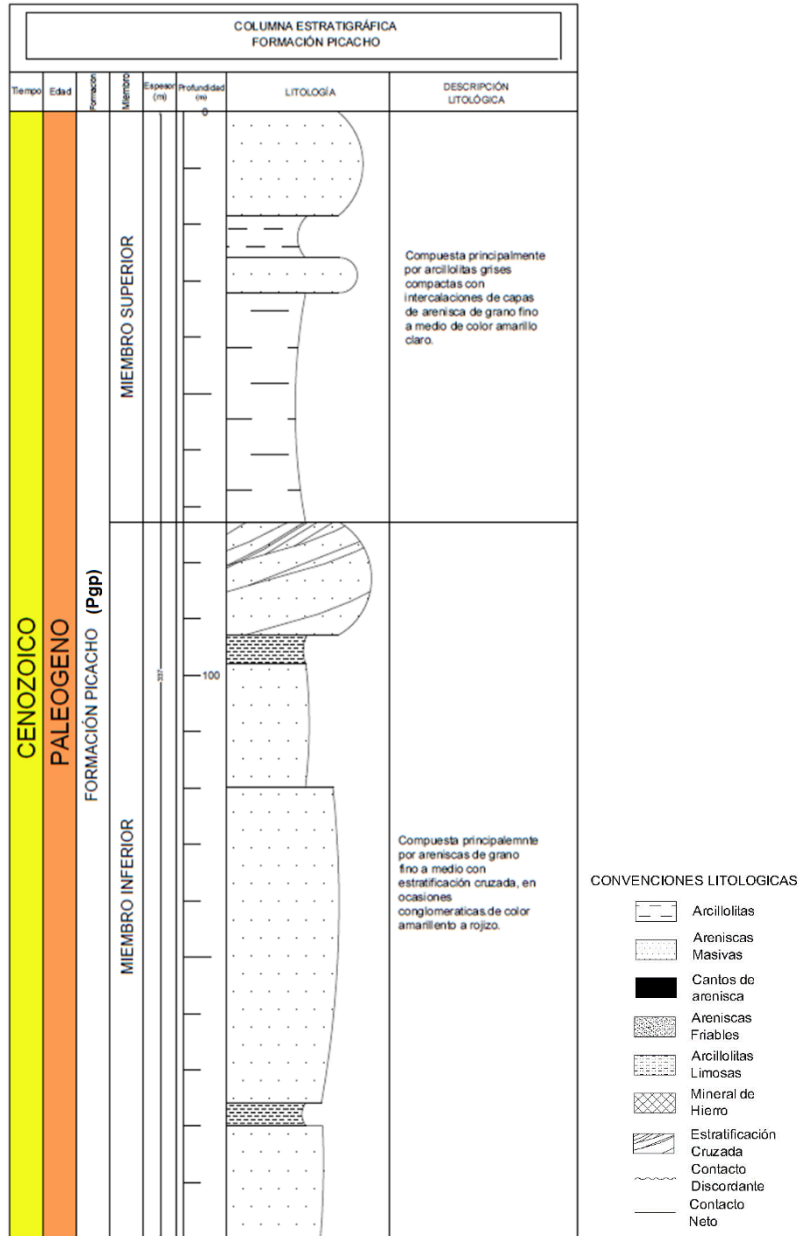
intercalaciones de niveles arcillosos que por meteorización dan tonalidades amarillentas y rojizas.

- **Miembro Superior (Pgps)**

Está constituido principalmente de arcillolitas grises oscuras, que se vuelven amarillentas y rojizas por meteorización. Presenta concreciones limoníticas, e intercalados de cuarzoarenitas color gris claro a blanco, de grano fino, con matriz arcillosa, friable y estratificada en capas muy gruesas. (Ver 0)

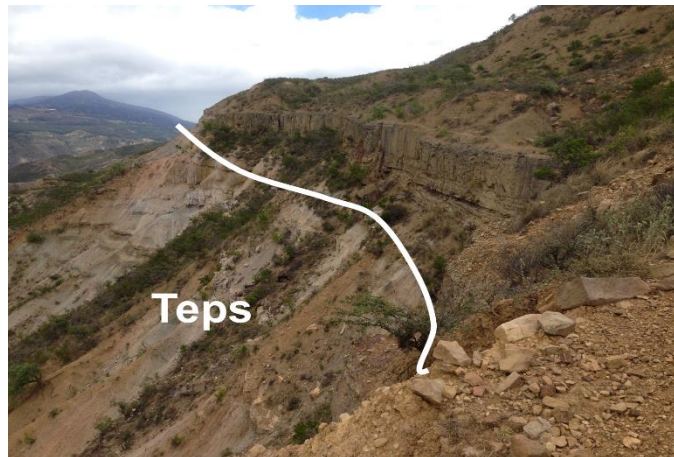
En la Figura 7 se muestra a columna estratigráfica de la formación Picacho (Pgp) subdividida por los dos miembros designados por Reyes Ítalo

Figura 7. Columna estratigráfica representativa de la Formación Picacho (Pgp).



Fuente: Minas PazdelRío.

Fotografía 2. Formación Picacho.

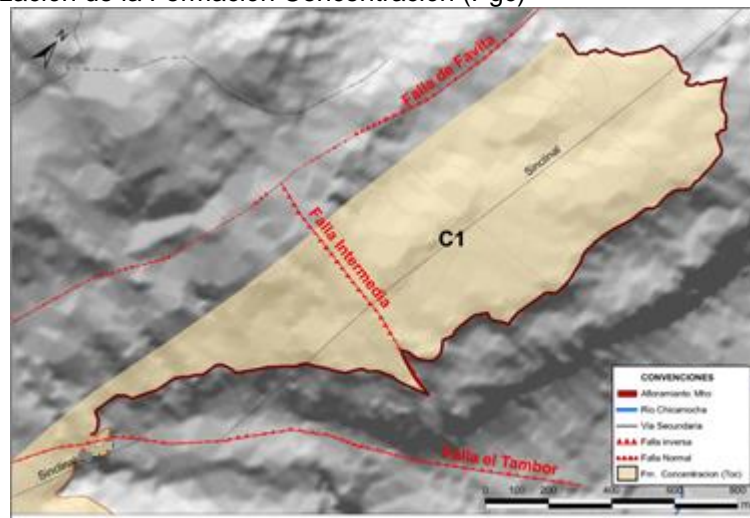


Fuente: Autor.

5.2.1.2 Formación concentración (Pgc)

El área de estudio se encuentra en el miembro inferior sobre la serie C1 denominada el Salitre, siendo esta la más antigua de las subdivisiones de la Formación Concentración como se observa en la Figura 9, con un espesor aproximado de 180 m en su totalidad de casi exclusivamente arcillolitas negruzcas o carmelitas, piríticas y con rastros carbonosos de vegetales, los 30 m inferiores consisten en arcillolitas verdosas con pequeñas intercalaciones de arenisca de grano fino sobre las que yace el banco de mineral de hierro que alcanza hasta los 7m de espesor. (Ver Figura 8). La Figura 9 muestra el miembro inferior de la Formación concentraciones para mejor detalle de la columna estratigráfica remítase a el ANEXO C.

Figura 8. Localización de la Formación Concentración (Pgc)



Fuente: Autor.

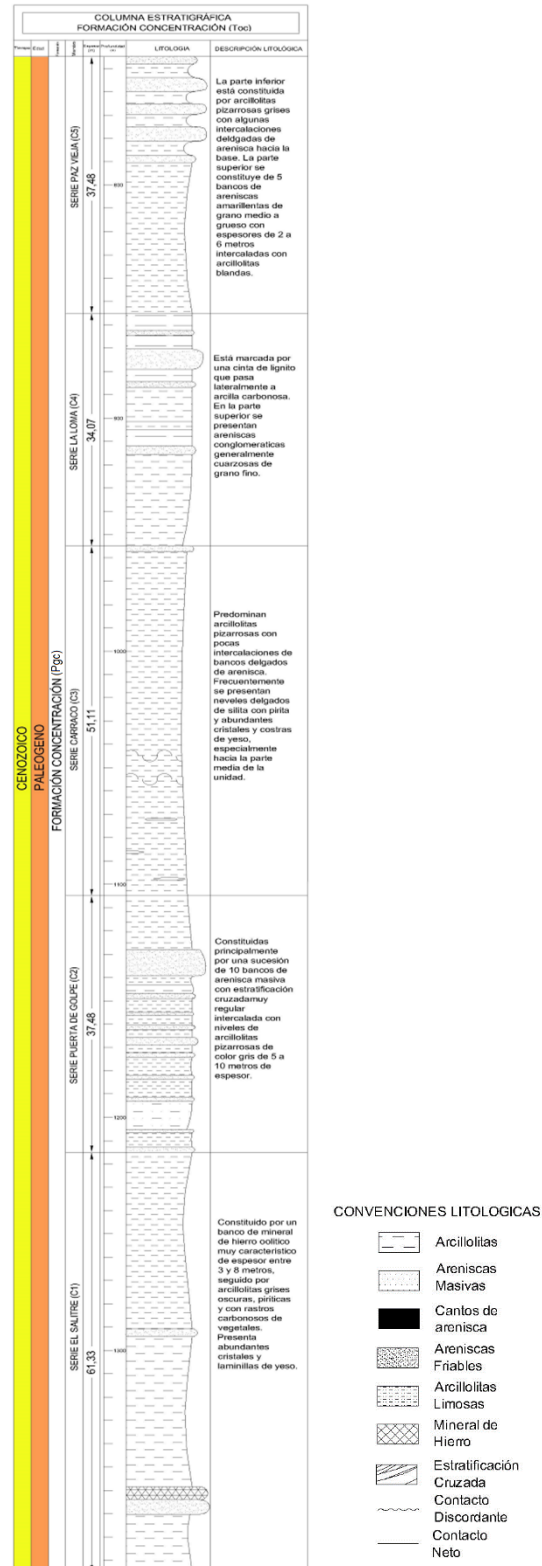
Serie El Salitre (C1). Es la base de toda la formación, constituida por un banco de mineral de hierro oolítico muy característico de espesor entre 3 y 8 m, seguido por arcillolitas negruzcas, piríticas y con rastros carbonosos de vegetales. Presenta abundantes cristales y laminillas de yeso. La Fotografía 3 muestra una imagen de la serie C1 y el banco de mineral de hierro sedimentado y expuesto en superficie en el área de estudio.

Fotografía 3. Afloramiento Formación Concentración y Mineral de hierro



Fuente: Autor.

Figura 9. Columna estratigráfica del miembro Inferior de la Formación Concentración (Pgc).



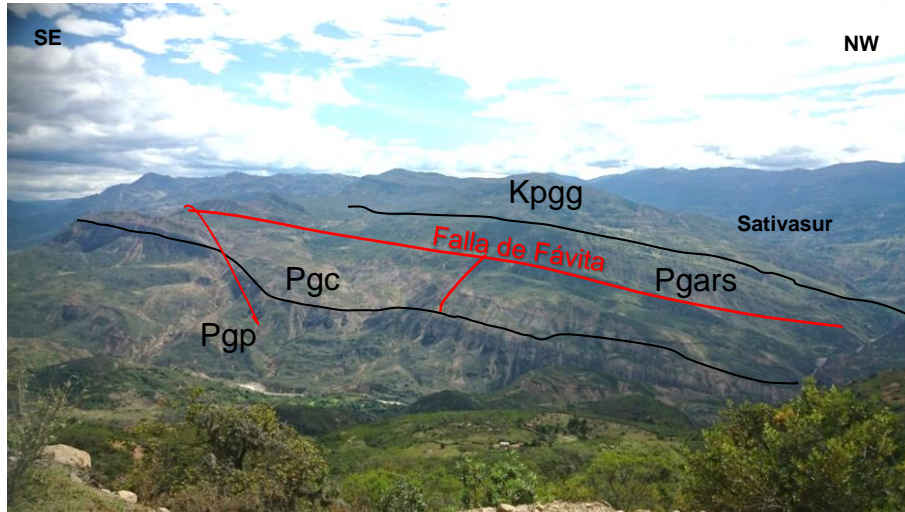
Fuente: Minas PazdelRío.

5.2.2 Tectónica.

El principal rasgo tectónico de la zona define la falla inversa de Fávita, que discurre en dirección noreste suroeste (NE-SE); El área de estudio se encuentra limitada al costado oriental por el afloramiento de mineral de hierro, mientras el límite al occidente es la Falla de Fávita, que pone en contacto la Formación Guaduas (Kpgg) con la Formación Socha Superior (Pgars) y Formación Picacho (Pgp). Este sector hace parte del bloque colgante de la falla de Fávita, el cual pertenece al flanco occidental del sinclinal del Chicamocha; dividiendo el área en dos sub-bloques (norte y sur), se encuentra una falla intermedia en dirección noroeste-sureste (NW-SE) de tipo normal, siendo así un indicativo de un posterior evento tectónico distensivo en un sector predominantemente compresional. (Ver Fotografía 4)

Es importante considerar los fuertes plegamientos presentes en el área que corresponden principalmente al sinclinal volcado, que encuentra su eje paralelo a la falla de Fávita.

Fotografía 4. Falla de Fávita



Fuente: Autor.

5.2.2.1 Falla de Fávita

Se localiza en la vereda de Fávita, se dirige a lo largo de la margen izquierda del Río Chicamocha cortando del flanco occidental del sinclinal de Chicamocha. Es de tipo inverso con rumbo NE y buzamiento de 70°SE, pone en contacto las rocas de la formación Guaduas con Rocas de las formaciones Picacho y Concentración.

5.2.2.2 Falla intermedia

Es una falla normal que va en dirección noroeste-sureste N75W/45SW. Divide el banco de mineral de hierro en dos bloques, donde el bloque sur se encuentra hasta 9m por debajo del bloque norte.

5.2.2.3 Falla el Tambor

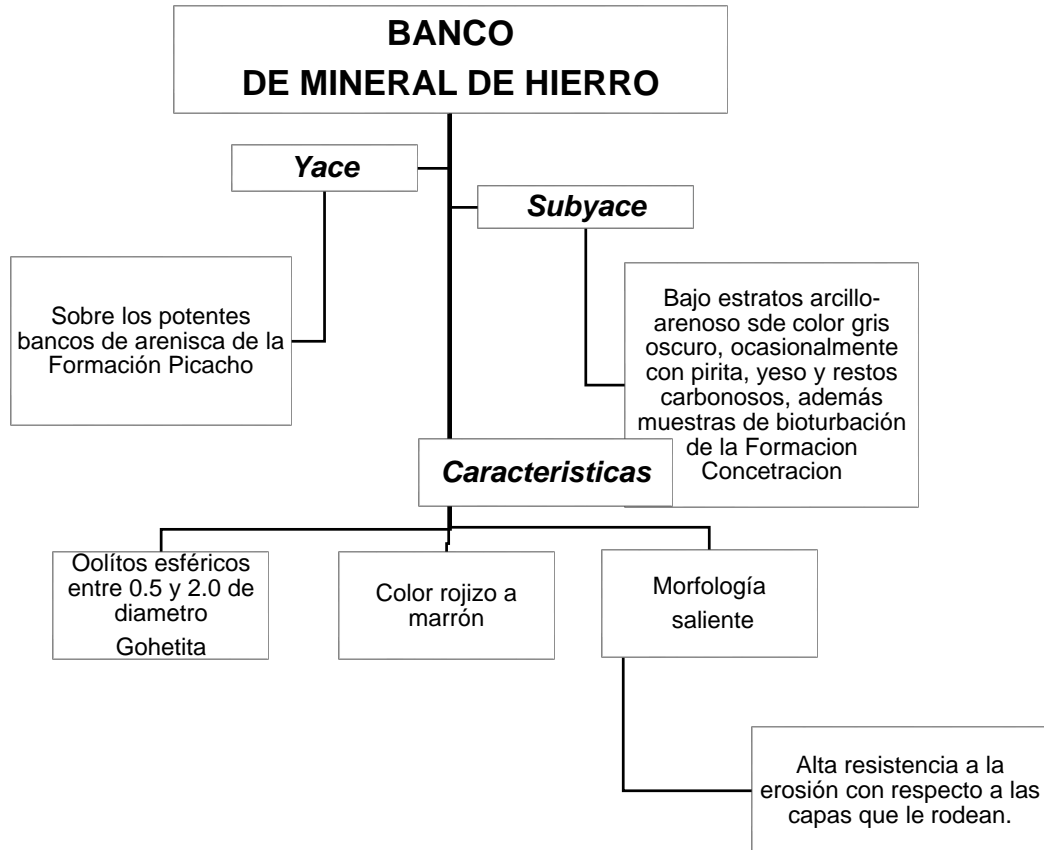
Falla inversa en dirección noreste-suroeste (N35E/50NW) la cual separa el mineral de hierro de una secuencia de areniscas ferruginosas que se encuentran al lado Sur este (SE) de la falla, donde aflora la serie C1, pero no hay evidencia de mineral de hierro.

5.2.2.4 Sinclinal

Es un pliegue apretado volcado, con dirección al NE, con núcleo en la Formación concentración; hacia el flanco occidental está limitado por la falla de Fávita, que pone en contacto la Formación Guaduas (Kpgg) con la Formación Picacho (Pgp) como se ve en la Fotografía 4. Sobre este mismo flanco se presenta la inversión estratigráfica dentro de la Formación Picacho (Pgp) y Formación Concentración (Pgc) debido a su volcamiento.

6 EXPLORACIÓN GEOLÓGICA

6.1 GEOLOGÍA DE SUPERFICIE



6.1.1 Base topográfica

Para la cartografía geológica obtenida se realizó a partir de la información primaria y de otras fuentes privadas, siguiendo los protocolos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e imágenes satelitales que se pueden obtener de otras fuentes. Para el análisis fotogeológico se tomó como base una imagen satelital IKONOS de alta resolución (2.0m por pixel), MPDR hizo la restitución aerofotogramétrica en escala 1:10.000 con curvas cada 20.0, 5.0 y 1.0 esta topografía fue recortada de tal manera que cubriera la zona de interés.

6.2 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

Para esta fase del proyecto se tuvo en cuenta la información preliminar de la prospección realizada, en donde definida la cartografía en mapas geológicos a escala 1:5000; y con un esquema superficial del comportamiento litológico se ubicaron de manera estratégica los distintos métodos directos e indirectos para la exploración del subsuelo, trazados en líneas geofísicas y puntos de perforación y apiques, permitiendo así delimitar el comportamiento y características del banco de mineral.

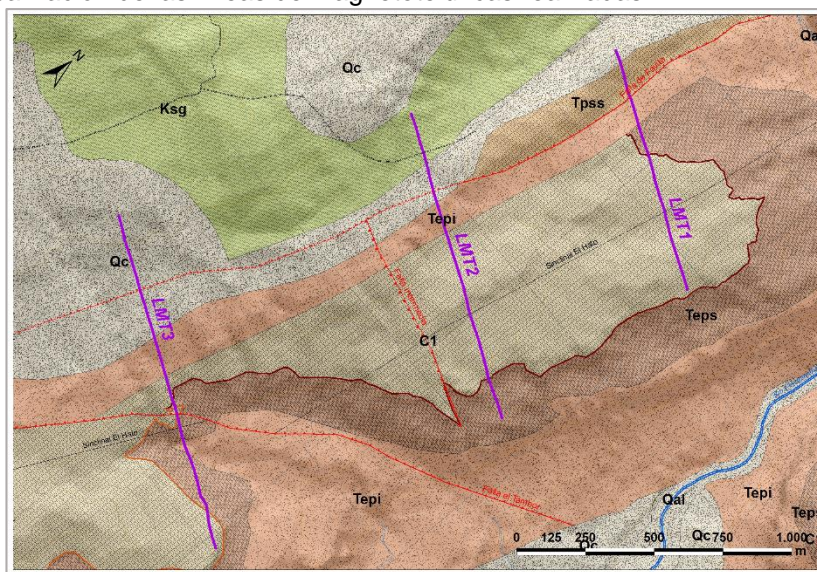
6.2.1 Geofísica.

La compañía Hydrocarbon Geotechnical Services S.A.S. (HGS) realizó las tres líneas Magnetotélúricas, (CSAMT), con dirección noroeste sureste de acuerdo al bloque de mineral como se observa en la Figura 10. En total fueron 3209,74m lineales de magnetotélúrica realizada en el área como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Líneas geofísicas realizadas

LÍNEA	MÉTODO	LONGITUD (m)
LMT1	CSAMT	900,68
LMT2	CSAMT	1146,26
LMT3	CSAMT	1162,80

Figura 10. Localización de las líneas de magnetotélúricas realizadas



Fuente: Autor.

6.2.1.1 Método magnétotelúrico (AMT)

La profundidad de penetración obtenida por el método puede alcanzar hasta un kilómetro y su resolución detecta cuando un techo es conductor. La técnica AMT, utiliza las ondas electromagnéticas naturales, inducidas en la superficie de la tierra, por la interacción de los vientos solares con el campo magnético terrestre y sistemas climáticos. La penetración de la técnica en el subsuelo depende solamente de la frecuencia de onda y de la resistividad del medio. Las imágenes producidas por las técnicas AMT y CSAMT, usan la energía natural electromagnética haciendo distinción de las rocas a partir de la conductibilidad eléctrica de las mismas. Normalmente un plano de falla o una mineralización metálica reflejan una anomalía, debido al incremento de la conductibilidad eléctrica que es el inverso de la resistividad (Ohm.m) y se expresa en milisiemens por metro (mS/m) y es generada por los iones que contienen los minerales o el agua enriquecida en sales que se infiltra.¹³ La Figura 11 muestra el comportamiento magnétotelúrico sobre la línea LMT1.

6.2.1.2 Interpretación

La interpretación de las líneas está basada en el razonamiento de que existe una anomalía electromagnética, en la zona de estudio se pueden apreciar los valores y la variación en los valores de resistividad aparente para cada una de las litologías que se encuentran en la zona de estudio como se muestra en la Tabla 3 la cual registra las resistividades por formación, miembro y presenta un espesor aproximado.

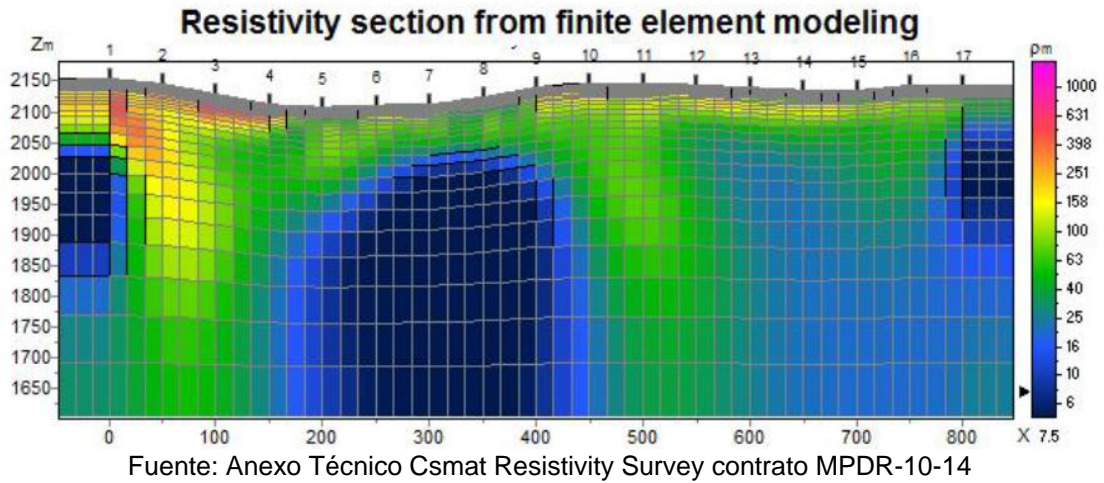
Tabla 3. Caracterización geológica – geofísica de las rocas exploradas.

FORMACIÓN	SERIE/ MIEMBRO	LITO CODE	LITOLOGÍA	ESPESOR APROX. (m)	Ra (Ωm)
Coluvial		Qc	Sedimentos variados		>100
Concentración	Salitre	C1	Hierro oolítico en la base (3-9m) seguidos de 150 m de arcillolitas negras carbonáceas y piríticas	160	<10
Picacho	Superior	Pgps	Arcillolitas gris oscuro	200	<50
Picacho	Inferior	Pgpi	Areniscas granosoportadas		>100
Socha Superior		Pgas	Arcillolitas con 2 intercalaciones de areniscas	217	>50
Socha Inferior		Pgars	Areniscas conglomeráticas en la base con alternancias de arcillolitas y areniscas	270	>100
Guaduas		Kpgg	Arcillolitas con mantos de carbón	420	>100
Ermitaño		Kse	En la parte superior areniscas compactas, seguidas de arcillolitas negras.		<20

Fuente: Anexo técnico Csmat Resistivity Survey contrato MPDR-10-14

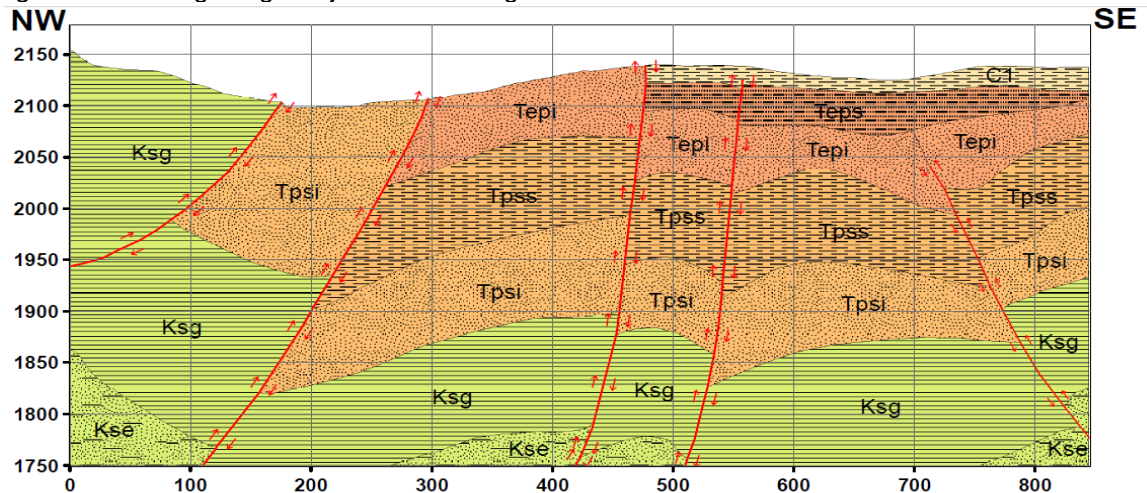
¹³ Hydrocarbon Geotechnical Services, Anexo técnico Csmat Resistivity Survey contrato MPDR-10-14, p.4-6

Figura 11. Perfil del comportamiento magnético de las rocas a lo largo de la línea LMT1



Las tres líneas magnetotelúricas fueron interpretadas según el comportamiento característico de las formaciones por resistividades como se muestra en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14 (Ver ANEXO F) el perfil de comportamiento magnético se evidencian anomalías con resistividades menores a $25\Omega_m$ en donde la resistividad aparente debería ser mayor por lo que la interpretación del perfil va ligada a los conocimientos previos del área dependiendo a la profundidad estimada de cada formación en la que estructuralmente es característico la evidencia de una faja plegada corrida.

Figura 12. Perfil geológico ajustado a lo largo de la línea LMT1



[illegible]

42

6.2.2 Excavación de apiques

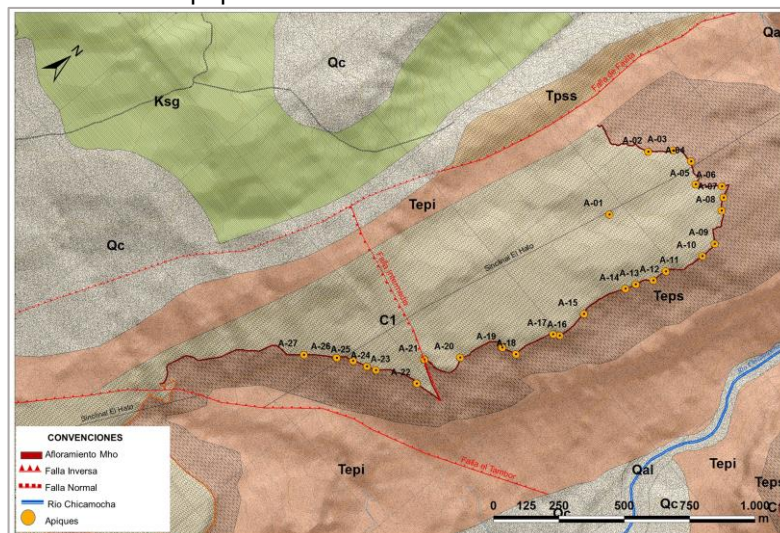
Se realizaron un total de 28 apiques mecanizados con perforadora manual como se observa en la Fotografía 5, de diámetro AQ (ancho de corona de 5.5mm), con longitudes corridas promedio de 1.0m por sondeo sobre todo el afloramiento del mineral como se observa en la Fotografía 5, se realizó conjunto a este la descripción litológica, con el fin de comprobar la disposición de las capas. Las localizaciones de los apiques se encuentran de manera relativamente regular consecuentemente a las condiciones del terreno como se muestra en la Figura 15 (Ver ANEXO E).

Fotografía 5. Realización de apiques a lo largo del afloramiento mineral.



Fuente: Autor.

Figura 15. Localización de los apiques en el área de estudio



Fuente: Autor.

6.2.2.1 Muestreo

Las muestras extraídas a partir de los apiques y sondeos superficiales fueron debidamente registradas y georeferenciadas (origen Bogotá- Observatorio), empacadas en bolsas rotuladas con el identificador correspondiente, enviadas al laboratorio de Paz de Río y otras Alpha1 S.A, con el fin de analizar la continuidad y calidad química (Difracción de rayos x) del yacimiento con un total de 52 muestras.

Fotografía 6. Muestras tipo apique debidamente empacadas y referenciadas.



Fuente: Autor.

6.2.3 Perforaciones

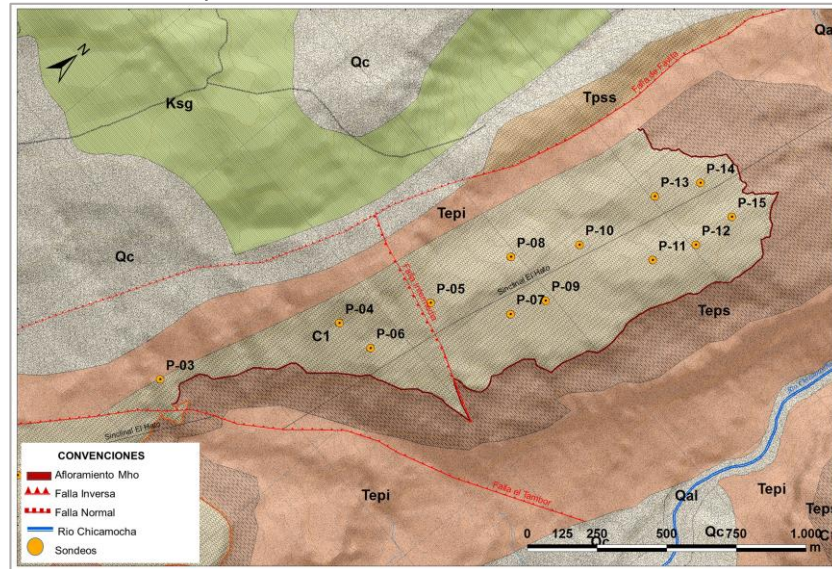
Fotografía 7. Sondeo P-05



Fuente: Autor.

Las perforaciones diamantadas se desarrollaron con un total de 1038 metros distribuidos en trece (13) perforaciones con un diámetro HQ (corona de tamaño 96.0 mm y 63.5 mm para el diámetro de perforación)¹⁴, con una longitud corrida promedio de 1.20 m. identificados como P-03 a P-15, a cada una de las perforaciones se hizo el respectivo logueo geológico-geotécnico como requisito indispensable para alimentar las bases de datos.

Figura 16. Localización de las perforaciones en el área de estudio



Fuente: Autor.

Durante la ejecución de las perforaciones se realizó una descripción geológica de superficie preliminar, dónde se evaluó la disposición y continuidad de las rocas presentes junto con la descripción litológica, espesor y demás características incluidas dentro del formato de logueo, esta descripción inicial muestra un espesor del banco de mineral de hierro de entre 2.5 m y 3.0 m.

El formato de logueo geológico-geotécnico reúne los siguientes campos:

- No Caja
- Intervalo de perforación
- Longitud corrida
- Longitud de recuperación
- Litología, Tipo de roca
- Descripción

¹⁴Sistema Americano Diamond core drill manuf. Assoc

Las perforaciones son clave en la creación y delimitación del mineral de hierro como método directo facilita la construcción del modelo geológico, junto con la demás información geofísica y geoquímica, permitiendo un análisis acertado y dimensionamiento geométrico del yacimiento para la posterior estimación y categorización de los recursos.

6.2.3.1 Muestreo

Se realizó la toma de 62 muestras mecanizados en los apiques y tomando techos y pisos del banco de mineral y en las perforaciones 90 para análisis geoquímicos por difracción de rayos x, con el fin de describir sus características, determinar la composición y además de las capas infra y subyacentes.

6.3 CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

Se adquirió información geofísica a partir de registros de pozo (*Gamma Ray*, *Caliper Density* y *Bit Size*) con la compañía *Century Wilreline Services South América*, con la cual se realizó una correlación estratigráfica, como se muestra en la Figura 17, partir de las perforaciones con las que fue posible correr la herramienta de los registros *Density* y *Gamma Ray*, ya que no en todos los pozos se pudo realizar por derrumbe y colapso como ocurrió en el pozo P-08; esta correlación evidencia el comportamiento lateral de las formaciones y la continuidad del banco de mineral de hierro en dirección Norte – Sur (N-S).

En la Figura 17, se denota en el banco de mineral una deflexión fuertemente marcada por un pico alto en el registro *Density*, que se diferencia fácilmente en el recorrido del registro, este tiende alcanzar valores de $3.5 \text{ (g/c}^3\text{)}$, el registro *Gamma Ray*, presenta una característica particular en donde muestra un pico alto, con una deflexión negativa corta, que permite identificar el contacto entre las arcillolitas de la formación concentración y el banco de mineral, en cambio hacia la parte del piso del mineral se observa una deflexión negativa marcada, característica de las areniscas limpias, que hacen parte de la formación Picacho. La correlación muestra perforaciones en las cuales hay doble banco de mineral respondiendo a la configuración estructural del sinclinal volcado debido a la dinámica interacción que tiene la falla de Fávita.

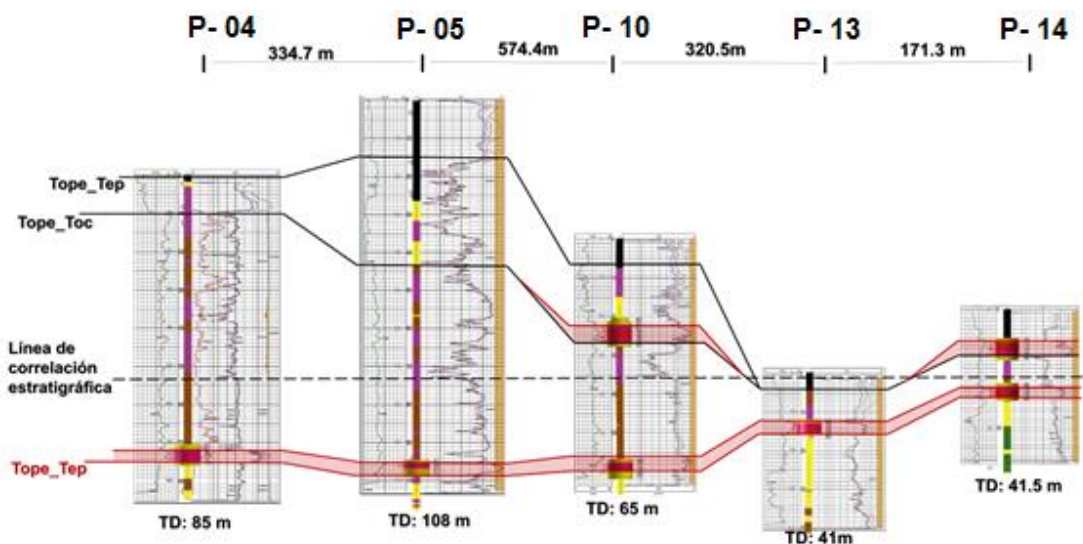
Fotografía 8. Caja de recuperación de núcleos para la perforación P-14



Fuente: Autor.

El análisis acertado en la correlación se realizó teniendo en cuenta el amarre roca-registro como se observa en la Figura 17, las cajas de recuperación de núcleos (Ver 0) junto con el logeo permitieron verificar dicha información.

Figura 17. Correlación estratigráfica orientada N-S con registros Gamma Ray y Density.



Fuente: Autor.

6.4 ANÁLISIS DE CALIDAD QA/QC

Es indispensable la implementación de controles de calidad QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) apropiados durante el desarrollo de la exploración y realización de la evaluación del yacimiento, garantizando una mayor confiabilidad en las estimaciones resultantes para los recursos minerales de las cuales dependen la calidad de los datos utilizados y la obtención de buenos resultados.

Para la exploración realizada en la zona se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- Muestreos sistemáticos
- Análisis de duplicados y blancos. (Diferencia relativa porcentual)
- Levantamiento de sondajes con precisión milimétrica.
- Bodegas adecuadas para el almacenamiento núcleos de sondajes
- Cierre estequiométrico
- Bases de datos isotópicas
- Auditorias bases de datos
- Correlaciones estratigráficas

Esta metodología de control de calidad permite detectar los errores de manejo y cuantificar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el laboratorio, la Gráfica 4 y Tabla 5 muestran la información general de las muestras remitidas al laboratorio **ALPHA 1 S.A.**, de la perforación P-05.

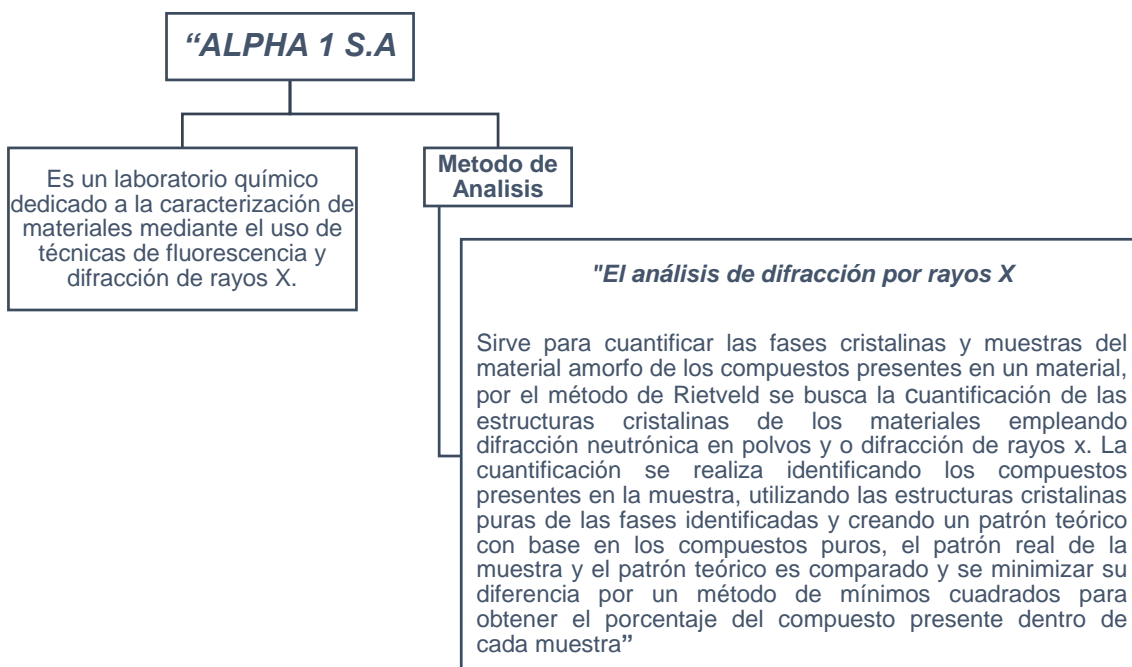
Tabla 4. Esquema de muestreo general realizado para análisis geoquímico en el pozo P- 05

Perforación	Caja n°	Desde (m)	Hasta (m)	Código muestra	Tubería	Longitud (m)	Litología	Fecha muestreo	Observaciones
P- 05	17	-	-	M-1	HQ	1.00	CLY	10/07/2015	TECHO
P- 05	17	-	-	M-2	HQ	1.31	I	10/07/2015	MINERAL DE HIERRO
P- 05	17	-	-	M-3	HQ	1.30	I	10/07/2015	MINERAL DE HIERRO
P- 05	17-18	-	-	M-4	HQ	1.00	SST	10/07/2015	PISO
Convenciones:									CLY: Arcillolita I: Hierro SST: Arenisca

Fotografía 9. Recuperación de núcleos para el pozo P-05 en el intervalo muestreado.



6.4.1 ALPHA 1 S.A.



Minas PazdelRío S.A. cuenta con una serie de muestras entre blancos y duplicados estandarizadas que se hicieron sistemáticamente, para llevar un control de calidad frente los resultados de laboratorios externos, en donde después de haber remitido la muestra al laboratorio, esta es analizada y los resultados deben ser coherentes entre blancos y duplicados, según su litología y las características propias del

material. Se enviaron al laboratorio un total de 152 muestras con un respaldo de ocho duplicados y dos blancos, la Tabla 5 contiene información relacionada con la concordancia de blancos y duplicados enviados y se expone los resultados de los análisis geoquímicos.

La validación de los datos geoquímicos, es el cálculo del cierre estequiométrico para cada una de las muestras como se muestra en la Tabla 5 se obtiene sumando, sílice, óxidos (no ferrosos), elementos puros, y pérdidas por calcinación, con un margen de tolerancia en el cual este cierre puede variar entre el 98% y 102 %. (Ver ecuación 1).

$$\text{CE} = \text{Silice} + \text{Puros} + \text{Oxidos No Ferrosos} + \text{loI} = 100\% + 2\% \quad (1)$$

Pero,

$$\text{Fe T} = \text{Fe (hematita)} + \text{Fe(gohetita)} + \text{Fe (magnetita)} \quad (2)$$

Del mineral analizado no se ha encontrado que la composición incluya magnetita, por tanto, el hierro total por estequiometria se obtiene mediante:

$$\text{FeT} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{1.29} + \frac{\text{FeO}}{1.44} \quad (3)$$

Tabla 5. Modelo de resultados geoquímicos y cierre estequiométrico.

HOLE_ID	CÓDIGO MUESTRA	MUESTRA DUPLICADA	OBSERVACIONES	SiO ₂	Óxidos	Fe_T	LOI	Fetch
DUPLICADO	M-1	M-20	HIERRO	29.750	22.947	43.896	3.350	99.944
DUPLICADO	M-2	M-21	HIERRO	30.705	23.609	42.115	3.540	99.969
DUPLICADO	M-3	M-22	HIERRO	44.179	17.262	35.129	3.420	99.989
DUPLICADO	M-4	M-23	HIERRO	23.497	22.483	50.891	3.080	99.951
DUPLICADO	M-5	M-24	HIERRO	13.877	28.054	53.499	4.540	99.969
DUPLICADO	M-6	M-25	HIERRO	10.898	26.738	58.703	3.660	99.999
DUPLICADO	M-7	M-26	HIERRO	16.451	29.602	46.725	7.230	100.007
DUPLICADO	M-8	M-27	HIERRO	19.066	25.506	51.823	3.580	99.975
BLANCOS	M-9		ARENISCA	64.661	24.680	7.679	2.960	99.980
BLANCOS	M-10		ARENISCA	65.141	24.653	7.250	2.920	99.965
P-03	M-25		HIERRO	10.825	27.011	58.373	3.780	99.989
P-05	M-20		HIERRO	31.325	21.331	42.913	4.360	99.930
P-06	M-21		HIERRO	26.896	23.470	46.747	2.880	99.994
P-10	M-22		HIERRO	40.776	17.930	38.064	3.220	99.989
P-10	M-26		HIERRO	16.637	28.178	44.677	10.540	100.033
P-12	M-23		HIERRO	19.533	26.301	50.951	3.150	99.935

Tabla 6. (Continuación) Modelo de resultados geoquímicos y cierre estequiométrico.

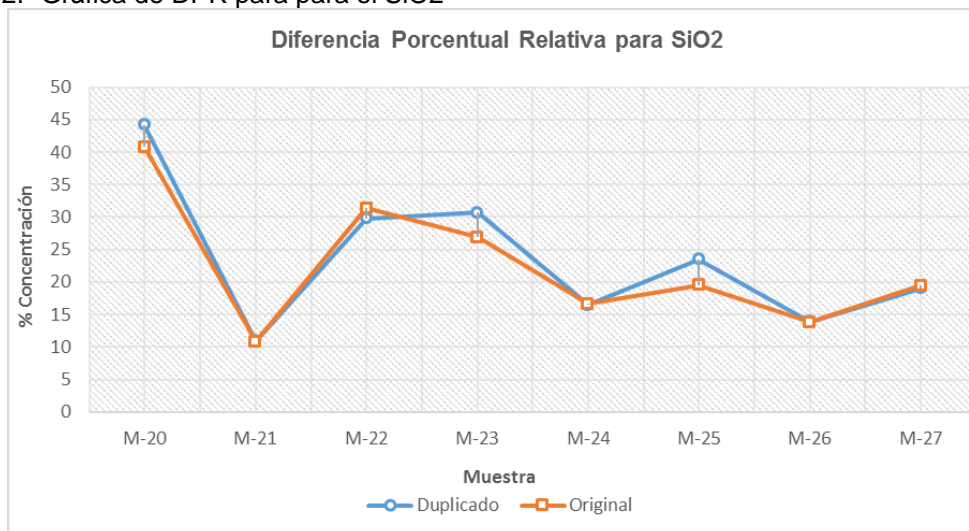
HOLE_ID	CÓDIGO MUESTRA	MUESTRA DUPLICADA	OBSERVACIONES	SiO ₂	Óxidos	Fe_T	LOI	Fetch
P14	M-24		HIERRO	13.814	27.668	52.220	6.290	99.992
A-09	MA-20		APIQUE	19.804	29.720	46.437	4.030	99.991
A-09	MA-21		APIQUE	23.300	29.903	42.100	4.670	99.974
A-10	MA-22		APIQUE	18.229	31.650	45.620	4.460	99.959
A-10	MA-23		APIQUE	23.182	29.854	43.184	3.750	99.969
A-11	MA-24		APIQUE	17.689	30.399	47.805	4.090	99.984
A-11	MA-25		APIQUE	20.146	30.672	45.052	4.090	99.960
A-12	MA-26		APIQUE	17.899	32.708	45.359	4.020	99.987
A-12	MA-27		APIQUE	24.506	28.660	42.827	3.970	99.963
A-13	MA-28		APIQUE	24.837	28.865	42.723	3.530	99.955
A-13	MA-29		APIQUE	22.266	29.421	44.622	3.670	99.980

Fuente: Autor.

6.4.2 Análisis de muestras QA/QC

El gráfico de diferencia porcentual relativa (DPR), de los duplicados muestra una dispersión menor al 10 % los cuales están dentro del rango de tolerancia para el QA/QC de la compañía. Partiendo de esta gráfica se puede decir los resultados son exactos, aunque muestra un sesgo de tolerancia que varía en la precisión, aun así este resultado es muy exacto suministrando confianza en los resultados obtenidos.

Gráfica 2. Gráfica de DPR para para el SiO₂



Fuente: Autor.

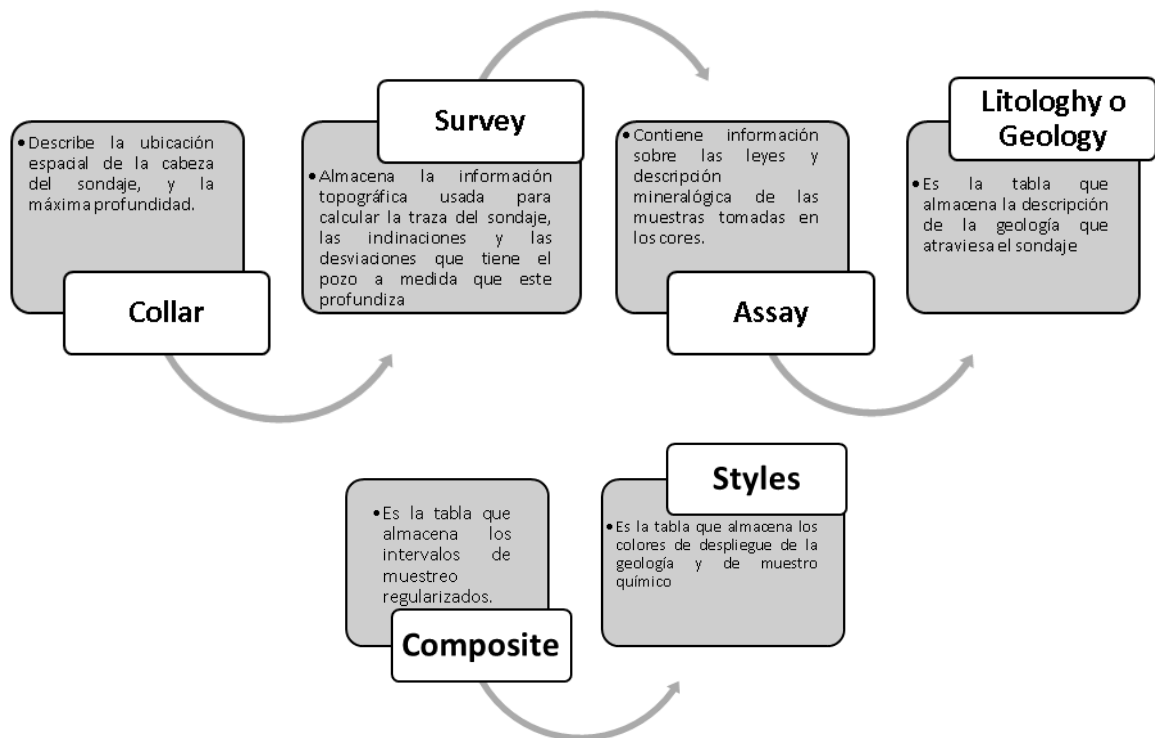
7 ESTIMACIÓN DE RECURSOS

Luego de la etapa de prospección y exploración, la estimación de recursos se considera una de las etapas más importante para la evaluación de un yacimiento mineral, dado que es una labor continúa dentro de la actividad minera que busca alcanzar los objetivos propuestos para la producción industrial.

La estimación de recursos busca determinar la cantidad y calidad de materia prima contenida en el yacimiento, teniendo en cuenta la definición de la geometría, sus características y calidades para obtener un reporte cualitativo y cuantitativo de los recursos.

7.1 BASE DE DATOS Ó “GEO DATABASE” (GDB)

Esta es la integración de la información en la exploración geológica, la cual se obtienen mediante sondajes, apiques, trincheras, análisis químicos, etc. Es indispensable utilizar el software indicado para la creación, ejecución y transmisión de la base de datos como se muestra el despliegue de la Figura 18, sumado a esto la GDB debe contar con una estructura que tenga en cuenta los requerimientos del software de modelamiento, SURPAC 6.4.1, según sus restricciones de uso la base de datos estará compuesta por (Ver Figura 19 “resumen de la base de datos”):



La creación de la GDB presenta diferentes etapas para su correcto desarrollo y validación, siendo esta la base de partida para la estimación y categorización de los recursos, en donde se tiene en cuenta:

El levantamiento del collar (se realizó con estación topográfica). La desviación que existe entre los levantamientos de collar y la restitución utilizada es de aproximados 2.5 m

- **(1). Verificación y posición de Sondajes**

La estabilidad del sondeo no permite hacer una repetición del registro Dipmeter, sin embargo si se puede sacar una desviación respecto a lo propuesto y lo registrado.

- **(2). Medición de desviación y certificación Survey**

Se verifica que no exista superposición entre los intervalos de una misma perforación, mediante la herramienta Auditoria de Bases de Datos de Surpac

- **(3). Overlapping o Traslape**

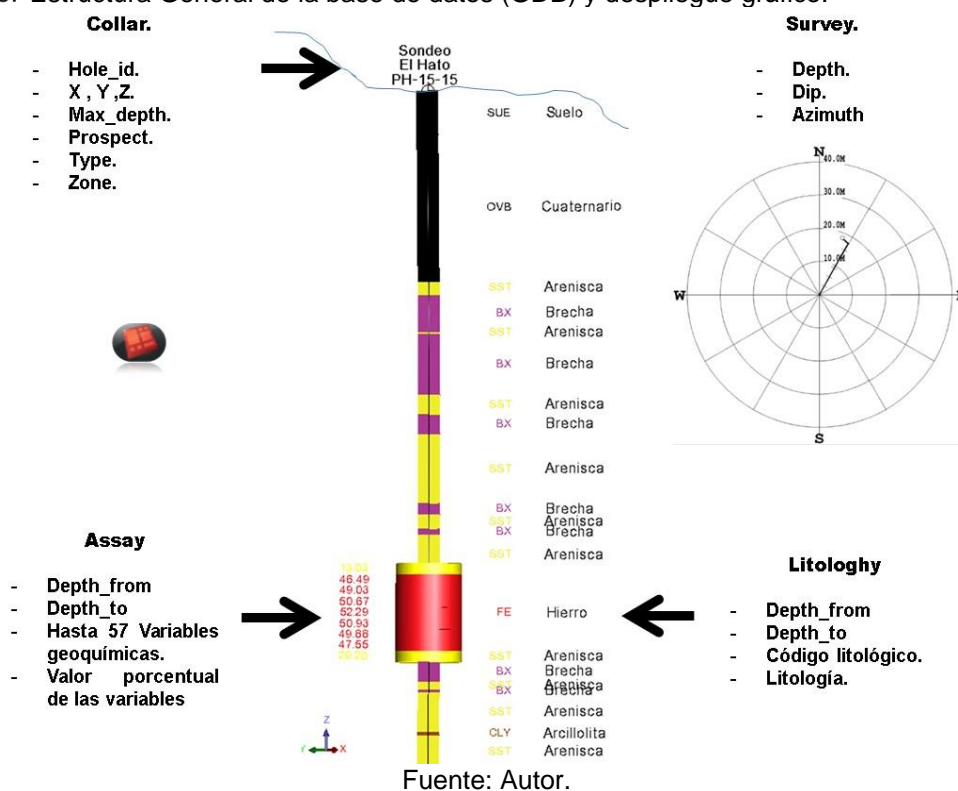
Se verifica que la sumatoria de las diversas variables químicas obtenidas en cada muestra se mantengan dentro del rango de tolerancia del 98% al 102%.

- **(4). Cierres estequiométricos**

“Anotación No se detectaron inconsistencias en la fase de auditoria y validación de los datos vinculados en la “GDB”

La base de datos se muestra homogénea, puesto que los datos de calidad para cada compuesto, son relativamente equivalentes entre cada una de las muestras lo cual se ve representado en el histograma del cierre estequiométrico o “FETCH” de la Gráfica 33.

Figura 18. Estructura General de la base de datos (GDB) y despliegue gráfico.



Fuente: Autor.

Figura 19. Resumen general de la base de datos.

Esquema de la Base de Datos							
Collar	Perforaciones		13	Tipo		*Sondeo	
	Apiques		28			*Apique	
	Long.Total Perf.		1038 m	Prospect			
Survey	Registro		987 m	Assay	Style	Variable	N_Samples
	Dip		()°			SiO2_T	136
	Azimuth		()°			TiO	136
	Depth		m			Al2O3	136
Litology	Style	Litology	Litocode			Fe	136
		Brecha	BX			Fe2O3	136
		Lutita	SH			FeO	136
		Arcillolitas	CLY			MgO	92
		Hierro	FE			CaO	122
		Limolita	SLT			K2O	77
		Arenisca	SST			S	—
		Coluvial	OVD			P2O5	76
		Suelo	SUE			LOI	136
	Intervalos		1636			Intervalos	136
	Prom. Long muestreo		3.5 m			Prom. Long muestreo	1.12 m

Fuente: Autor.

7.2 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

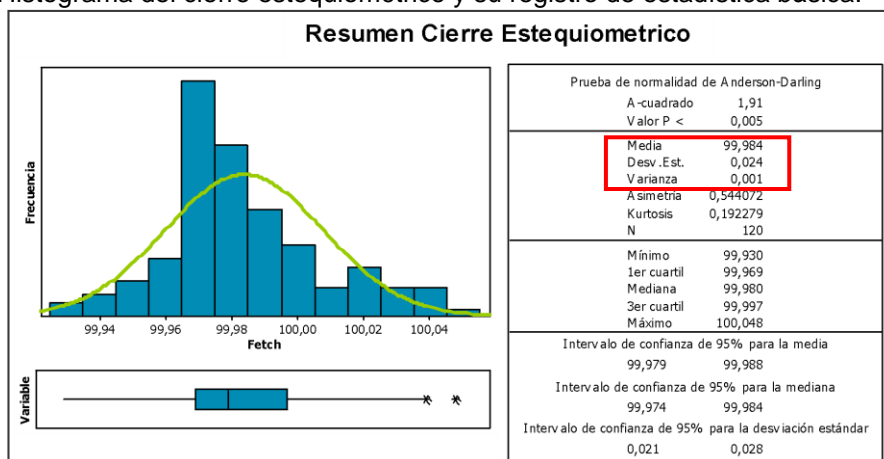
7.2.1 Datos Originales

Con la información original se realiza un análisis estadístico básico para identificar características y particularidades en los datos que permitan demostrar si la base de datos se cataloga como homogéneo o heterotópica, los datos analizados se representan en los histogramas y correlaciones para cada elemento y por dominio.

7.2.1.1 Cierre estequiométrico o Fetch

Busca que la sumatoria total de las variables químicas obtenidas en cada muestra se mantengan dentro del rango de tolerancia del 98% al 102% como indicador de confianza superior al 95% en los valores de cada componente químico reportado por el laboratorio Esta verificación se realiza a través de histogramas que permitan el análisis estadístico de las diferentes variables

Gráfica 3. Histograma del cierre estequiométrico y su registro de estadística básica.

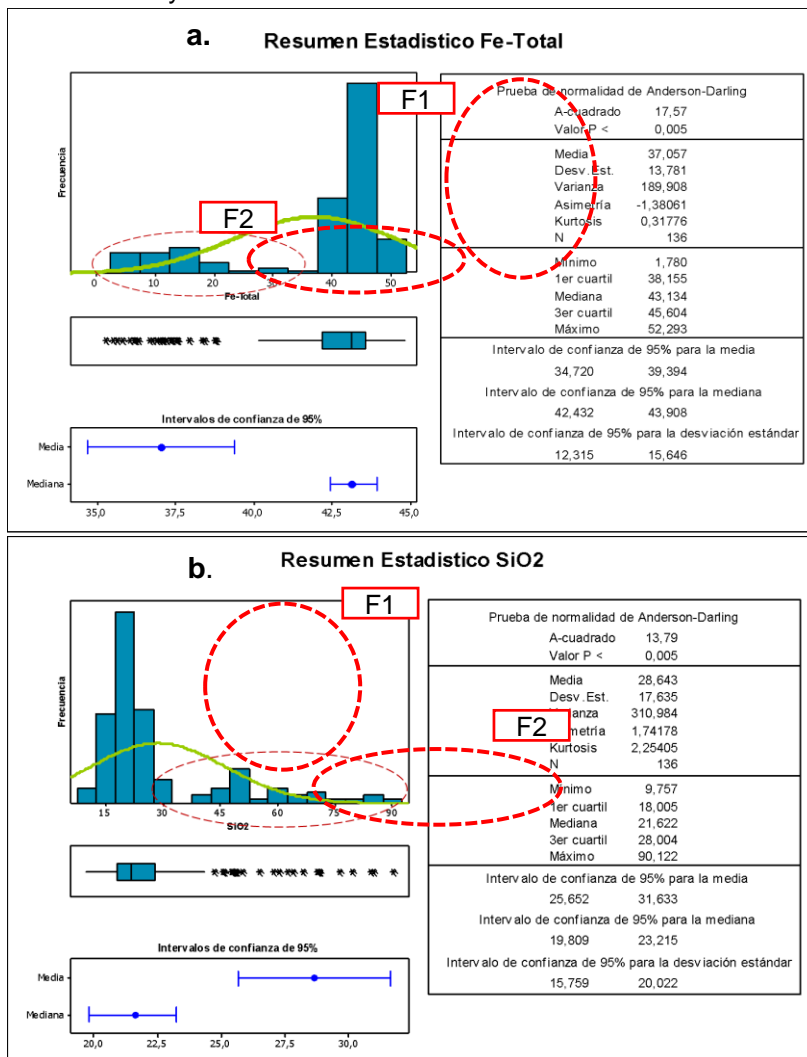


El histograma de la 3 muestra una distribución de los datos simétrica, unimodal, con una varianza de 0.001 y una media del 99.9 % es decir los valores se encuentran dentro del rango de confianza y exactitud.

7.2.1.2 Análisis de dependencia de las variables compositadas.

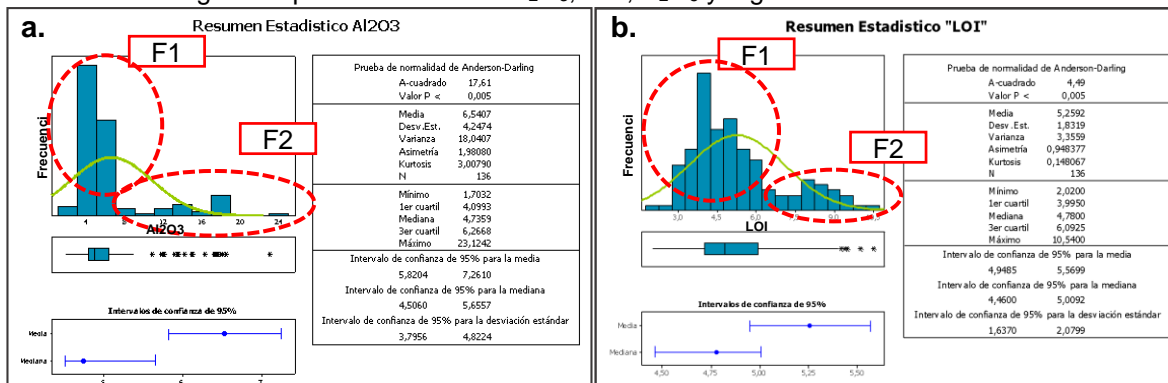
Para cada uno de los componentes presentes en las muestras es necesario realizar histogramas que permitan examinar los valores obtenidos y discriminen las familias presentes según el contenido químico, teniendo en cuenta que se muestrearon techos, pisos y el banco mineral. Para el análisis estadístico se tomó la química de Fe Total, SiO₂, Al₂O₃, LOI, P₂O₅, MgO siendo los principales compuestos que intervienen y de mayor interés para la industria del acero y caracterización del yacimiento.

Gráfica 4. Distribución de los datos para cada una de las variables más importantes en la producción del acero. Fe y SiO₂

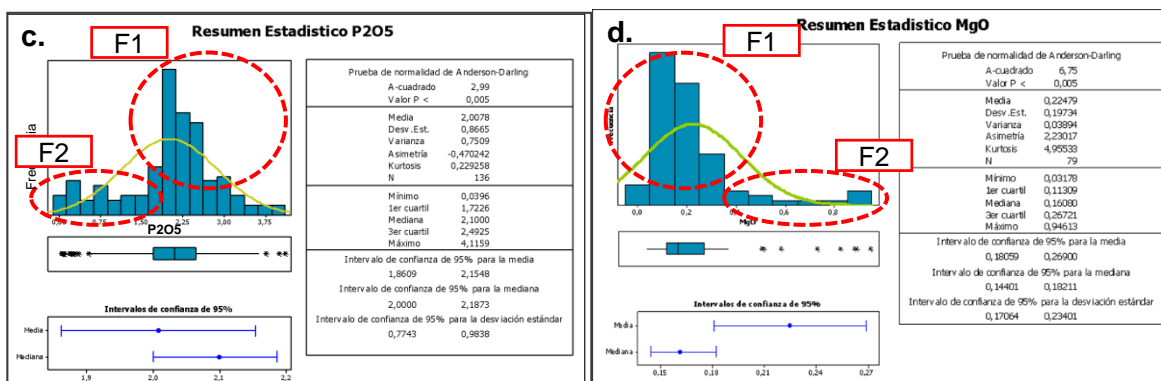


Fuente: Autor.

Gráfica 5. Histogramas para los datos de Al₂O₃, LOI, P₂O₅ y MgO.



Fuente: Autor.



Fuente: Autor.

Los histogramas de la Gráfica 4 y Gráfica 55 muestran la distribución de los datos con presencia de dos litologías, descritas como:

Familia 1 (F1) con valores entre el 40% y 52% de hierro total (Fe) y menores 9% y 20% de sílice (SiO_2), alúminas (Al_2O_3) entre 3% y 6%, óxido de Magnesio (MgO) entre 0.03% y 0.05%, Pentóxido de Fósforo (P_2O_5) entre 1.5% y 4.12% y pérdidas por calcinación (LOI) con un porcentaje menor al 4%, considerando así el mineral de hierro como cuerpo mineralizado que por sus cualidades indica ser útil para el proceso siderúrgico.

Familia 2 (F2) corresponde a valores bajos para el rango anterior en Hierro total y el P_2O_5 con valores superiores para el SiO_2 , Al_2O_3 , MgO y LOI, catalogando este material como arenisca ferruginosa, que hace parte los pisos del cuerpo mineralizado, las cuales no se deben tener en cuenta para la definición de dominios estructurales debido a que alterarían significativamente la cualificación del yacimiento. El contenido de hierro total Gráfica 4 (a.) muestra una distribución asimétrica sesgada a la derecha por la presencia de arenisca ferruginosa, el P_2O_5 es un componente proporcional al contenido de hierro con una distribución normal, el SiO_2 , Gráfica 4 (b.), Al_2O_3 , MgO y las LOI Gráfica 6 (a.), (b.), (d.), presentan una distribución sesgadas a la izquierda.

7.2.2 Datos Compositados

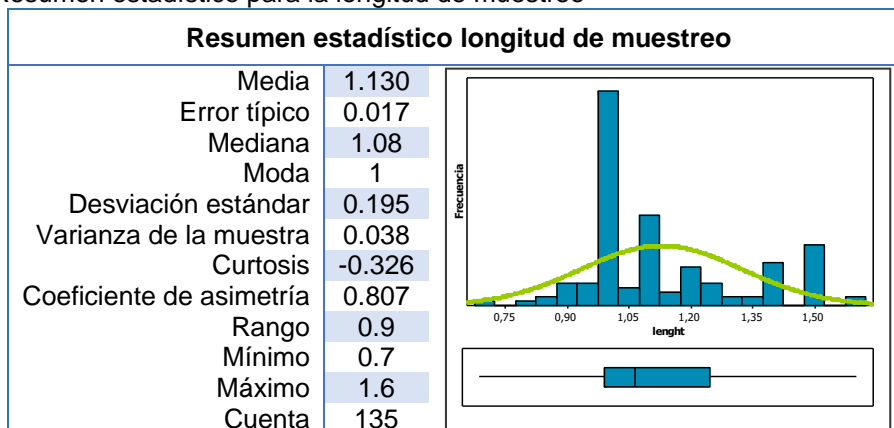
La información es compositada con el fin de uniformizar los tramos de muestreo de los datos originales a una longitud de tramo constante, por lo que se hace importante regularizar la longitud de muestreo, esta longitud estará en función a la información de la cual se dispone. El Análisis exploratorio de datos (AED) para los compósitos se realiza a través de histogramas; todo esto para cada elemento y dominio usado.

7.2.2.1 Regularización de las muestras

En primera estancia se debe compositar las muestras a una longitud constante que oscila dentro de los valores de longitud original de muestreo, teniendo en cuenta los valores registrados en la base de datos, el histograma de la Tabla 7 que muestra valores entre de 0.70m a 1.60m con una media de 1.00m y una moda de 1.08m.

No se observan valores anómalos, teniendo en cuenta la gráfica se toma la decisión de compositar las muestras a una longitud de un metro (1m) ya que la varianza es tendiente a cero también se hace necesario composito teniendo en cuenta la longitud corrida del sondeo manual realizado en los apiques.

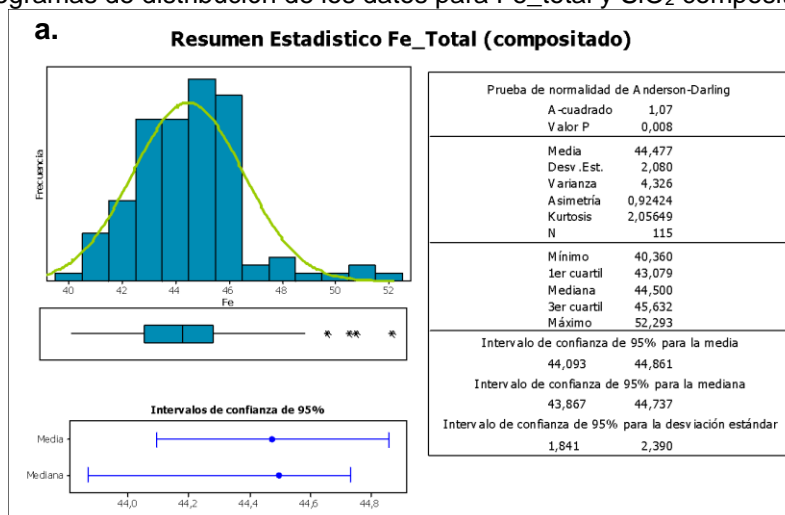
Tabla 7. Resumen estadístico para la longitud de muestreo



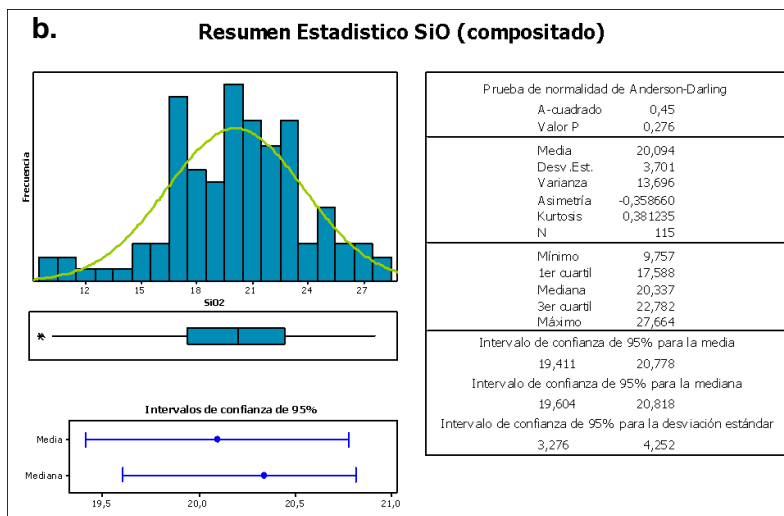
Fuente: Autor.

7.2.2.2 Normalización, dependencia y correlación de las variables compositados.

Gráfica 6. Histogramas de distribución de los datos para Fe_total y SiO₂ compositados.

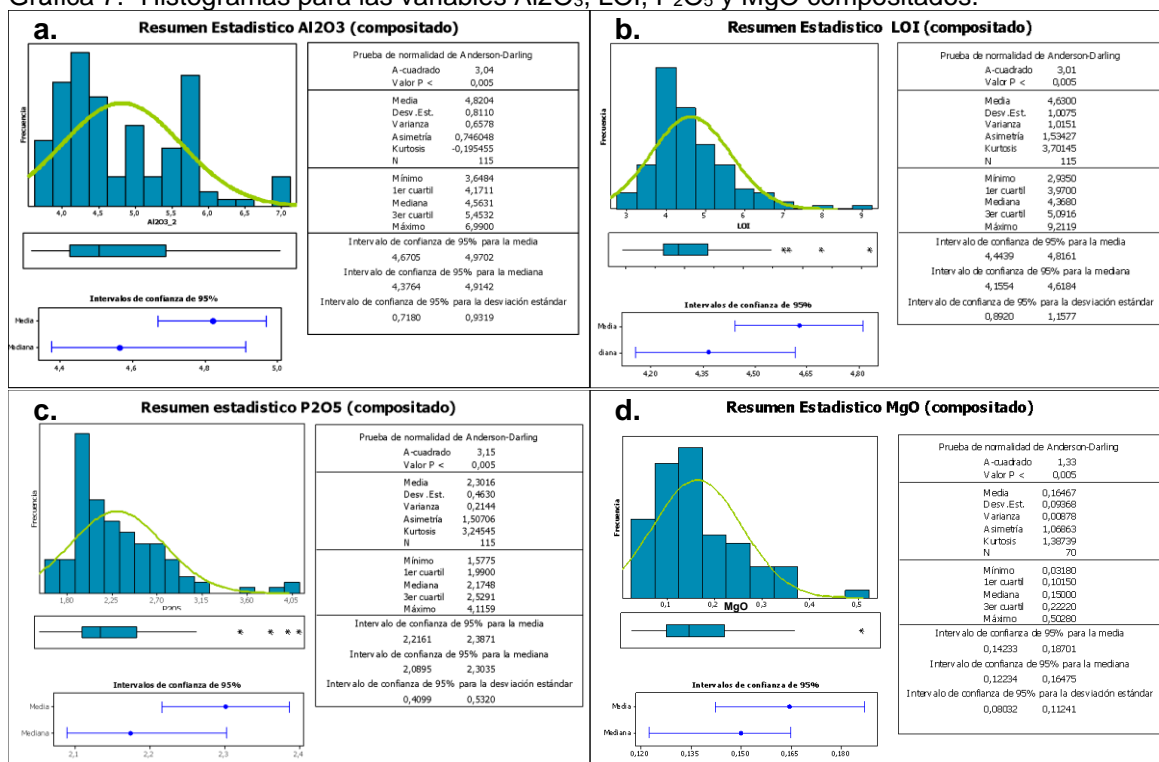


Fuente: Autor.



Fuente: Autor.

Gráfica 7. Histogramas para las variables Al₂O₃, LOI, P₂O₅ y MgO compositados.



Fuente: Autor.

Las gráficas realizadas con los datos compositados solo fueron relacionadas las muestras que se encuentran dentro del banco mineral que es de interés económico, los cuales se filtraron en la base de datos dejando al descubierto el mineral de hierro según las características químicas con un porcentaje >40% en Fe, en estos

histogramas se presentan valores anómalos o aislados que indican mayor porcentaje o calidad en el material haciendo que se dispersen y crezca la varianza. La campana de distribución presenta sesgo, puesto que se encuentran dentro de rangos con calidades superiores al 48%. A continuación, se presenta en la Tabla 8 el resumen de la estadística descriptiva de las variables a vincular en el proceso de estimación de recursos para el área de estudio.

Tabla 8. Resumen estadístico de las variables compositados

Resumen estadístico datos compositados “Mineral de Hierro”						
	Fe	SiO ₂	LOI	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO
Media	44.477	20.094	4.630	4.820	2.302	0.165
Error típico	0.194	0.345	0.094	0.076	0.043	0.011
Mediana	44.500	20.337	4.368	4.563	2.175	0.150
Moda	44.533	21.220	3.850	5.800	2.000	0.035
Desviación estándar	2.080	3.701	1.008	0.811	0.463	0.094
Varianza de la muestra	4.326	13.696	1.015	0.658	0.214	0.009
Curtosis	2.056	0.381	3.701	-0.195	3.245	1.387
Coeficiente de asimetría	0.924	-0.359	1.534	0.746	1.507	1.069
Rango	11.932	17.906	6.277	3.342	2.538	0.471
Mínimo	40.360	9.757	2.935	3.648	1.578	0.032
Máximo	52.293	27.664	9.212	6.990	4.116	0.503

Fuente: Autor.

La Tabla 8 de resumen estadístico muestra una varianza baja de para las variables de Fe y SiO₂ y muestra valores cercanos entre la media, moda y mediana exponiendo una calidad inicial aproximada del 44.5% para el Fe y 20.3% del SiO₂. Esto indica que el banco de mineral posee buena calidad para el proceso siderúrgico.

Coeficientes de correlación:

Con el fin de identificar el tipo de método a usar en la estimación es necesario durante esta fase exploratoria de datos, saber y entender el comportamiento y la dependencia de las variables, en este caso se podría, encontrar una dependencia como una independencia completa de las variables a relacionar, dicho comportamiento se explica a partir de los coeficientes de correlación.

Tabla 9. Coeficientes de correlación

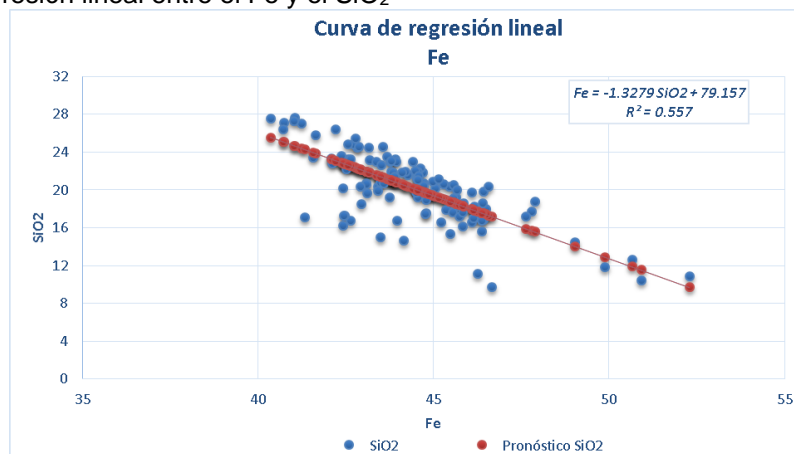
Variable	Fe	Fe ₂ O ₅	SiO ₂	LOI	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO
Fe	1						
Fe ₂ O ₅	0.824	1					
SiO ₂	-0.746	-0.481	1				
LOI	-0.200	-0.360	-0.385	1			
Al ₂ O ₃	-0.058	-0.380	-0.351	0.648	1		
P ₂ O ₅	0.154	0.271	-0.417	0.129	-0.049	1	
MgO	0.000	0.000	-0.277	0.561	0.358	-0.033	1

Fuente: Autor.

Los coeficientes de correlación, son la expresión numérica que nos indica el grado de relación existente entre las dos o más variables y en qué medida se relacionan, Su magnitud indica la dependencia o independencia de las mismas. Son números que varían entre los límites +1 y -1. indica el grado de asociación entre las variables; el valor $r = 0$ indica que no existe relación entre las variables; los valores (1 son indicadores de una correlación perfecta positiva (al crecer o decrecer X, crece o decrece Y) o negativa (Al crecer o decrecer X, decrece o crece Y).¹⁵

De la 0, de coeficientes de correlación con respecto al Fe se observa que las variables Al₂O₃ y MgO son independientes las LOI (perdidas por calcinación) es de dependencia baja, el Fe y el Fe₂O₃ al ser una dependiente de la otra sus valores indican una correlación muy alta, mientras que el Fe y SiO₂ se muestra una similitud negativa alta con valores menores al (-0,7) que muestran una dependencia inversa, mientras que el Al₂O₃ y LOI; LOI y MgO presentan valores positivos por encima del (0.6) que indican una dependencia lineal moderadamente fuerte.

Gráfica 8. Regresión lineal entre el Fe y el SiO₂



¹⁵ <http://www.monografias.com/trabajos85/coeficiente-correlacion-karl-pearson/coeficiente-correlacion-karl-pearson.shtml#ixzz45OKPajO5>

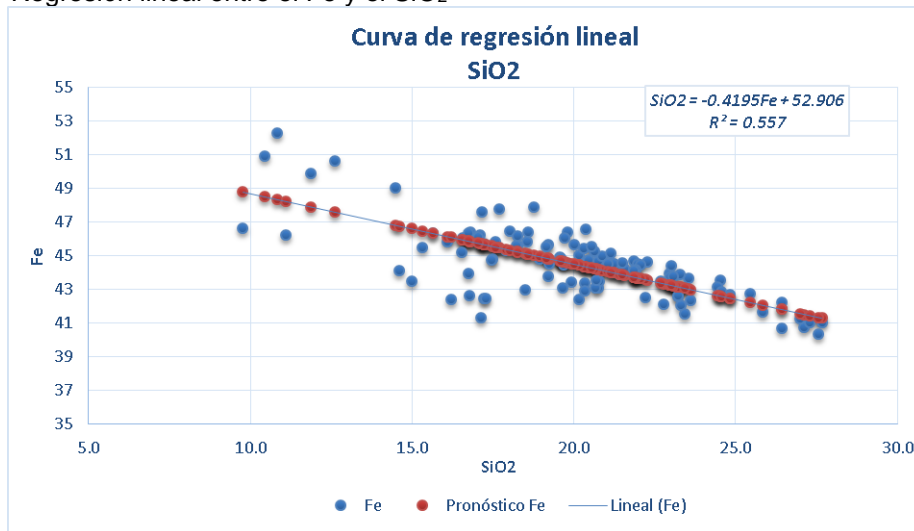
La Gráfica 8 muestra una dependencia lineal negativa no muy marcada entre las variables de Fe y SiO₂, arrojando la siguiente ecuación con un R²= 0.557,

$$Fe = -1.3279 * SiO_2 + 79.157 \quad (1)$$

Despejando SiO₂ de la Ecuación (1) tenemos:

$$SiO_2 = -0.7531 * Fe + 59.611 \quad (2)$$

Gráfica 9. Regresión lineal entre el Fe y el SiO₂



La Gráfica 9 muestra una dependencia lineal negativa entre las variables de SiO₂ y Fe baja, arrojando la siguiente ecuación con un R²= 0.557, igual a la anterior, la ecuación presenta una pendiente e intercepto diferente al que se despejo anteriormente en la Ecuación (2), en donde según la regresión lineal obtenida en recta original de SiO₂ corresponde a:

$$SiO_2 = -0.4195 * Fe + 52.906 \quad (3)$$

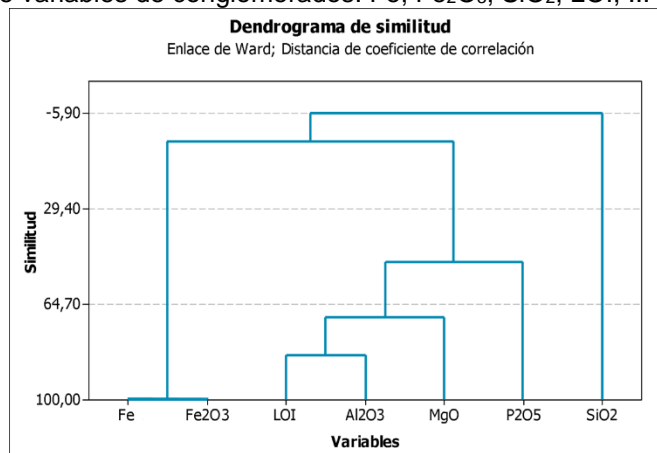
Con el fin de calcular un valor único a la pendiente y al intercepto recurrimos al promedio de las ecuaciones (2) y (3) obteniendo:

$$SiO_2 = -0.5863 * Fe + 56.258 \quad (4)$$

La ecuación 4 muestra la normalización de la pendiente y el intercepto, de las variables que presentan una dependencia lineal más fuerte.

Del anterior análisis y como se observa en la Gráfica 10, se puede concluir la independencia lineal de las variables con respecto al Fe, contenido en el banco de mineral, el dendrograma (Gráfica 10) muestra la amalgamación de las diferentes variables y junto con la correlación anterior, se encuentra similitudes directas e inversas entre ellas con valores que van de -5.9% a 100 %.

Gráfica 10. Análisis de variables de conglomerados: Fe; Fe₂O₃; SiO₂; LOI; ...



Este diagrama de árbol identifica las variables que más se asemejan, en este caso el Fe y el Fe₂O₃ tienen una similitud del 100% porque una depende directamente de la otra, las otras variables respecto a la Fe presentan un rango de similitud menor al 50% y una similitud más marcada entre ellas mismas como las LOI y el Al₂O₃, pero no directamente del hierro; el SiO₂ muestra una similitud negativa marcada por debajo -5.90, esto conlleva a que todas las variables no son completamente dependientes al hierro es decir unas dependen de otras.

Luego de esta identificación de dependencia e independencia entre variables se procede a tomar la decisión de hacer la estimación por Kriging Ordinario y no Co-Kriging; ya que el Co-kriging toma el Kriging Ordinario y lo lleva un paso más allá al considerar la correlación entre las distintas variables como dependientes.

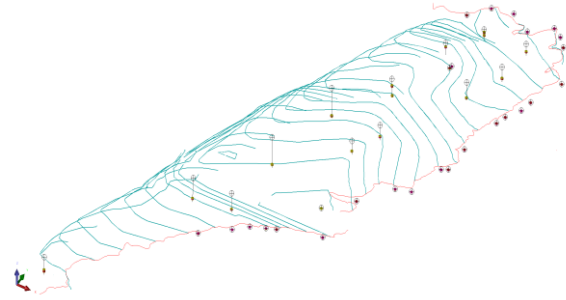
7.3 DEFINICIÓN DE DOMINIOS E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

Para una estimación de recursos acertada, se debe tener una correcta interpretación y aplicación de los criterios geológicos, ya que de esta depende la creación de un modelo geológico congruente, basados en la continuidad del mineral, la ley del yacimiento, un muestreo representativo, análisis geofísicos e interpretación geológica coherente siendo, el componente principal de la estimación de recursos.

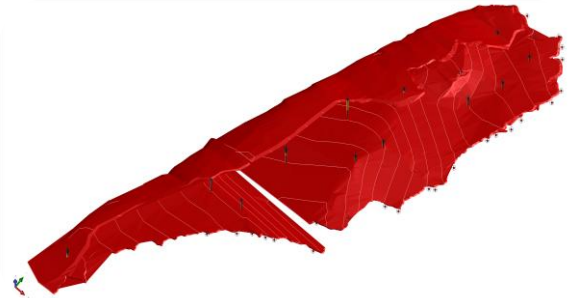
7.3.1 Modelo Geológico

Los dominios geológicos no son más que zonas geológicamente y estadísticamente homogéneas. Cuando se crea un modelo geológico del yacimiento se debe subdividir el mismo en sub poblaciones que cumplan o se aproximen a la hipótesis de estacionariedad. Este método se realizó de la siguiente manera como se muestra en la Figura 20.

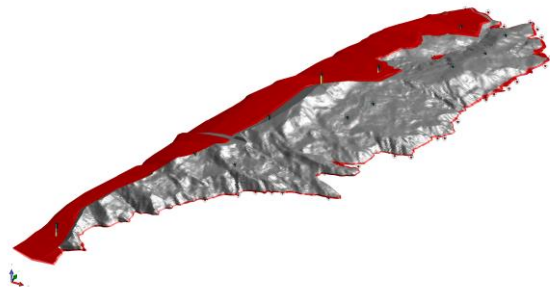
Figura 20. Método de definición de dominios y creación del modelo geológico:



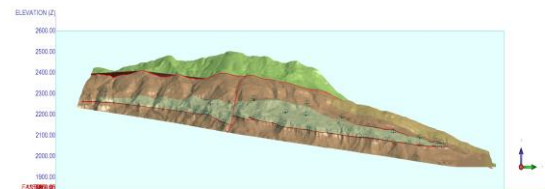
1). Extracción de los puntos de la intersección de la traza del pozo con los planos estructurales, creación del contorno.



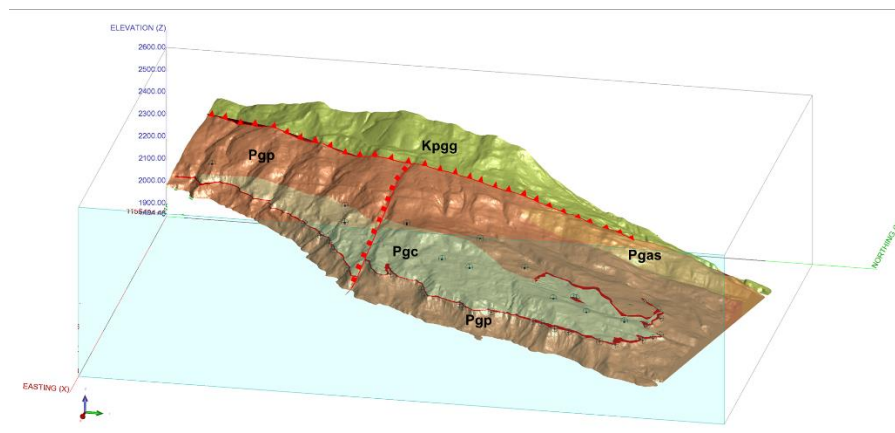
2). Triangulación, Gridding o modelo de superficies.



3). Combinación de las superficies y generación del sólido.



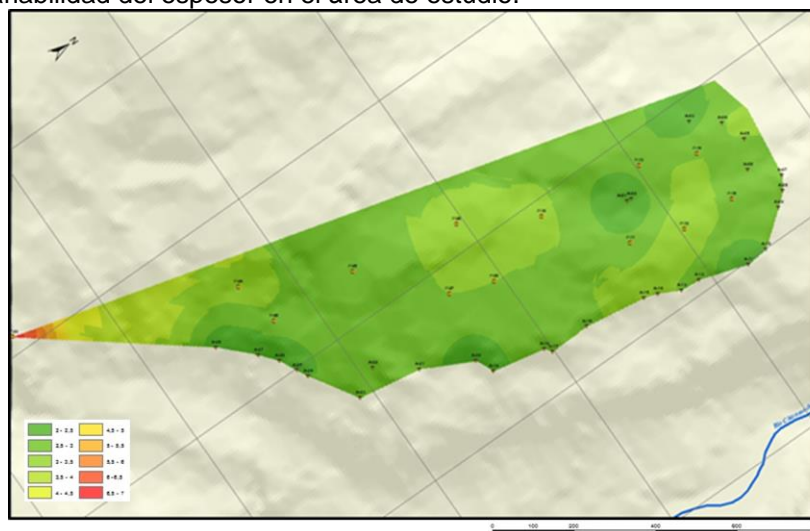
4). Generación modelo geológico.



Fuente: Autor.

La definición de los límites de los dominios geológicos, lo cuales determinan la geometría del cuerpo mineralizante, es el método básico para aplicar control geológico a la estimación durante la modelación de los recursos. Para un yacimiento estratiforme de baja complejidad estructural es posible confeccionar los sólidos modelando las superficies estructurales que limitan por encima y por debajo los cuerpos geológicos por el método de contornos.

Figura 21. Variabilidad del espesor en el área de estudio.



Fuente: Autor.

La Figura 21 muestra la homogeneidad del espesor en el área del mineral de hierro, mientras que en la zona sur se ve un cambio que se exhibe en el pozo P-03, el cual tiene un espesor promedio de 7 metros e indica el contacto del cierre del sinclinal. Es indispensable tener presente el valor del espesor del yacimiento y variabilidad a lo largo de él, este define parte del modelo geológico.

7.4 VARIOGRAFÍA.

7.4.1 Análisis de Variables.

La geoestadística es una disciplina que estudia fenómenos regionalizados (es decir, fenómenos que presenten una estructura espacial). Provee herramientas fundamentales para la estimación de variables regionalizadas tales como ley, porcentajes de variables químicas, densidad y en general toda razón de cambio que vincule dichas variables. La geoestadística es por lo tanto la herramienta más confiable para hacer la estimación de recursos de un yacimiento enfocado a explotación minera.

La geoestadística propone dos objetivos fundamentales:

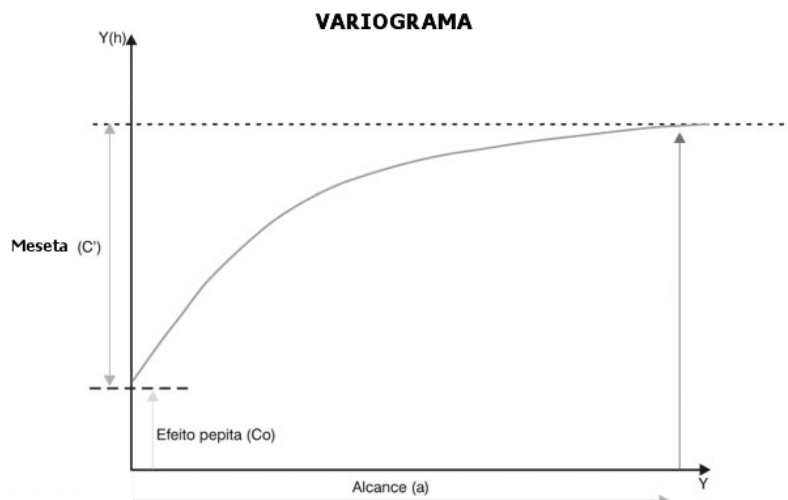
- Estructurar matemáticamente las relaciones de la variabilidad entre 2 puntos en el espacio, o sea, medir la zona de influencia, el grado y tipo de variabilidad restringido a un campo homogéneo.
- Establecer un modelo espacial de distribución de una variable regionalizada con la medida de la precisión de su estimación..

El análisis de variables fue realizado para los elementos Fe (%), SiO₂ (%), Al₂O₃ (%), P₂O₅ (%), del mineral de hierro que se encuentra en la Goethita, presente en el área de estudio, resultando en variogramas que permiten hacer buenas interpretaciones pese a que las líneas de información corresponden a la trazada por la exploración directa la cual no corresponde precisamente a una malla geoméricamente distribuida.

7.4.2 Cálculo de los variogramas

El cálculo del variograma es la herramienta Geoestadística más importante en la determinación de las características de variables y correlación espacial del fenómeno estudiado, ya que mide el contraste entre dos datos en función de su separación espacial en dirección de un vector de separación (h). con esto se construye el variograma experimental que mide la desviación cuadrática promedio entre dos datos en función de su separación espacial pero solo es calculada para algunos valores de (h).

Gráfica 11. Representación gráfica de un variograma básico



7.4.3 Variogramas experimentales u omnidireccionales

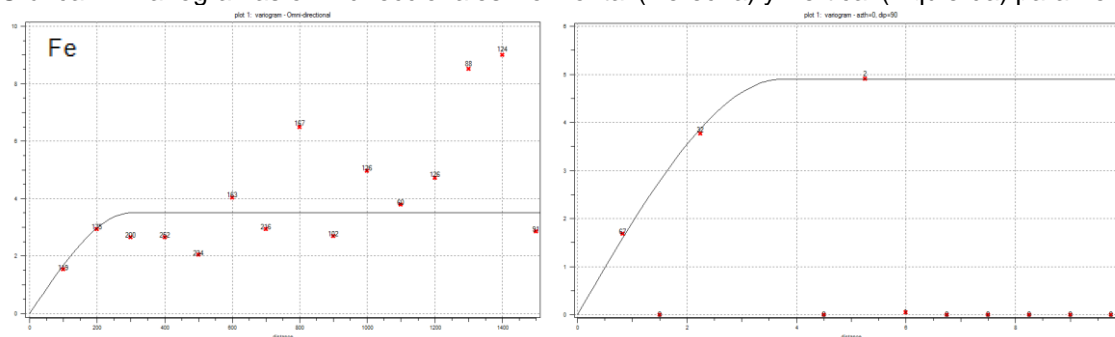
Luego del análisis exploratorio de datos y establecido el análisis estadístico de las variables se analiza la continuidad espacial de las variables, en donde a través de un proceso más bien de prueba y error, se llega a la conclusión de que las direcciones de anisotropía utilizadas serán una dirección omni – horizontal, que cubre todo el plano horizontal, y una dirección vertical. Los parámetros de cálculo utilizados son los siguientes.

Tabla 10. Parámetros de cálculo utilizados.

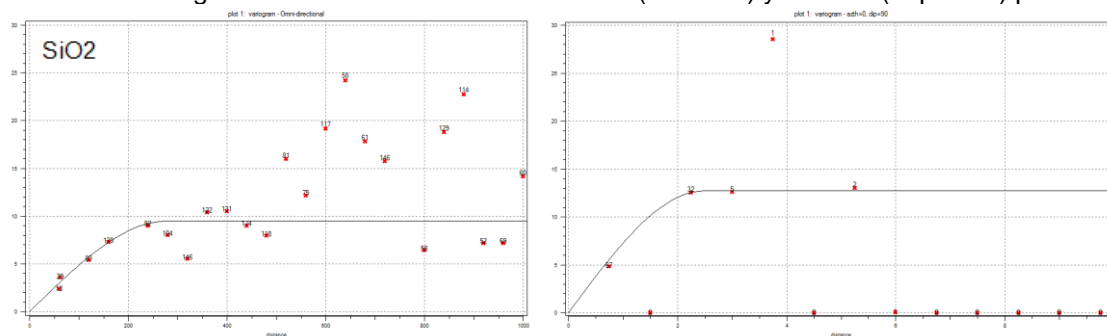
<i>Descripción</i>	Omni Horizontal	Vertical
<i>Tolerancia Azimut</i>	90°	0°
<i>Ancho de banda (m)</i>	22.5	22.5
<i>Tolerancia Dip</i>	22.5°	10
<i>Altura de Banda (m)</i>	50	25
<i>Numero de pasos</i>	25	25
<i>Tamaño del paso</i>	50	0.75
<i>Tolerancia del paso</i>	5	0.15

En las próximas graficas se exhiben los variogramas experimentales, directos y cruzados, para la variable de mayor dominio, en el mineral de hierro. En total 4 variables como se muestran en las Graficas de la 13 a la 15, todos son calculados con la aplicación Sgems.

Gráfica 12. Variogramas omnidireccionales Horizontal (Derecha) y Vertical (Izquierda) para Fe.



Gráfica 13. Variogramas omnidireccionales Horizontal (Derecha) y Vertical (Izquierda) para SiO_2



Gráfica 14. Variogramas omnidireccionales Al_2O_3 (Derecha) y P_2O_5 (Izquierda) para SiO_2

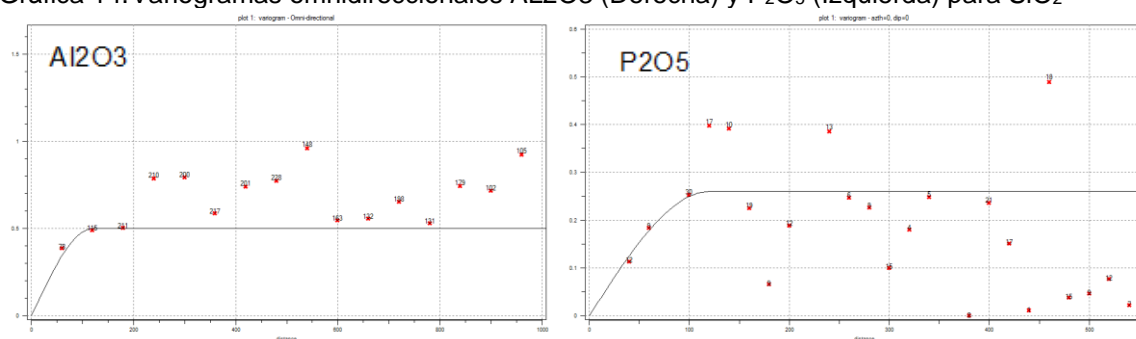
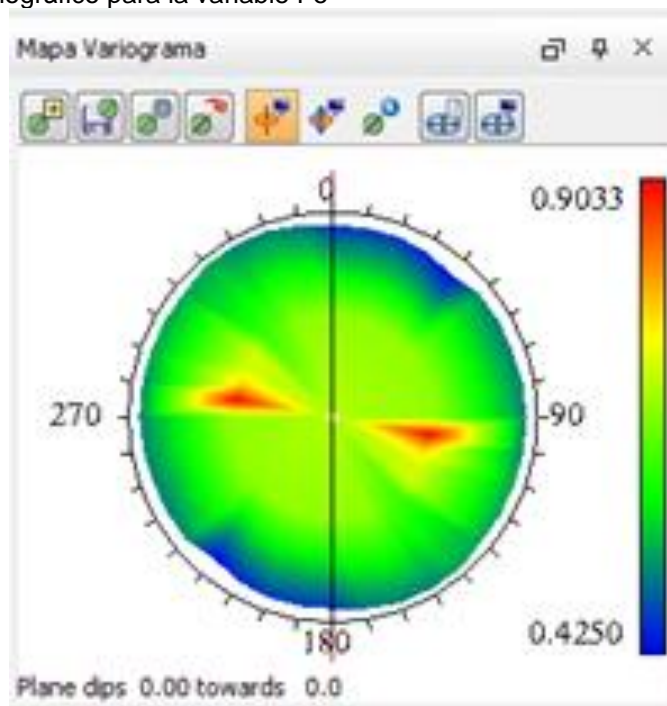


Figura 22. Mapa variográfico para la variable Fe



Los variogramas omnidireccionales demuestran que la función variograma si existe porque la varianza existe y es constante para cada una, como se evidencia en las anteriores graficas la meseta es tendiente a la varianza registrada en el análisis exploratorio (AED), los variogramas omni-horizontales, evidencia una similitud de comportamiento entre variables esto se debe a la continuidad de las mismas en el yacimiento, la periodicidad se relaciona a la poca cantidad de datos que se obtienen de la exploración y la presencia de estructuras en el yacimiento como es el sinclinal volcado y la falla intermedia.

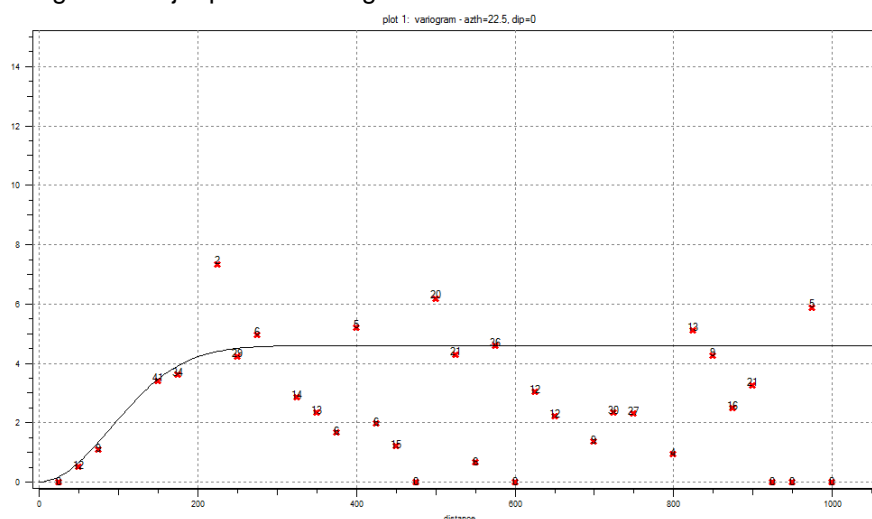
7.4.4 Variogramas Directos

La definición de la estructura espacial está dada por un variograma en la línea de mayor alcance (Major), un variograma secundario (Semi mayor) y un variograma Vertical en dirección al espesor (downhole). Estos variogramas son ortogonales entre si para la definición de la anisotropía. El análisis de variables fue realizado para as variables Fe(%), SiO₂(%), Al₂O₃(%) y P₂O₅(%) del banco de mineral de hierro, como variables que resultan dependientes.

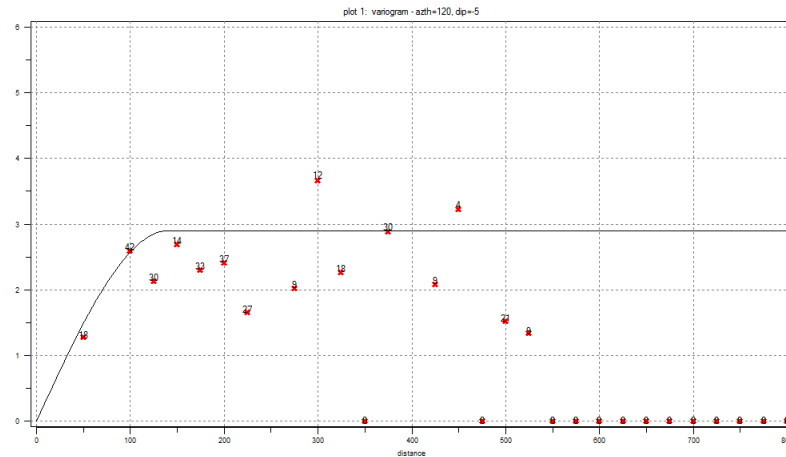
Tabla 11. Estructura del variograma de mayor alcance.

Property	Estructures	Range	Sill	Nug	Anisotropy		Azimuth	22.5
Fe	2	140	1.8		Major minor	Major semi	Plunge	0
		220	2.8		110	1.467	Dip	0
SiO ₂	1	200	11		110	1.467		
Al ₂ O ₃	1	240	0.65		110	1.467		
P ₂ O ₅	2	240	0.18		110	1.467		
		228	0.2		110	1.467		

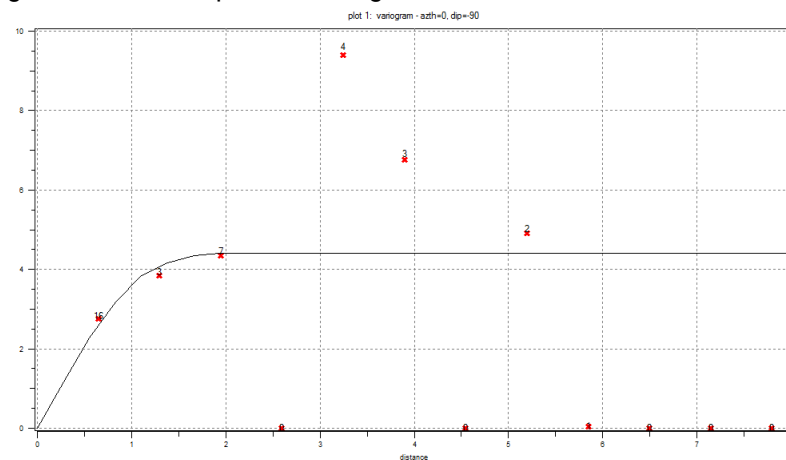
Gráfica 15. Variograma Major para el Fe. Sgems Software.



Gráfica 16. Variogramas SemiMajor para el Fe. Sgems Software.



Gráfica 17. Variograma Downhole para el Fe. Sgems Software



1. En general no se presenta un efecto pepita.
2. A pesar de la elección cuidadosa del paso, hay una alta variabilidad que dificulta la determinación de las mesetas; por tanto, se utilizó el ajuste automático de mesetas que provee el software Sgems.
3. Para las direcciones se utilizaron modelos esféricos, dado que existe un comportamiento lineal cerca del origen, en el caso del variograma de la Gráfica 15 no existe tal correlación lineal por lo que se hizo el modelo de gauss.
4. Para el variograma N22.5°E el alcance usado fue de 220 en una dirección de mayor alcance, de 150 en la Semi mayor, y la meseta fue de 3.5

5. El variograma experimental hacen pensar que podría existir un efecto de hoyo, sin embargo, no se incorporó en el modelo, pues se consideró que lo más importante es ajustarse al sector de distancias h bajas, pues éste es el sector de mayor confiabilidad del variograma.

7.4.4.1 Validación.

Por definición, la vecindad de Kriging debe ser infinita (de tamaño) para asegurar el insesgo global de la estimación que es lo que realmente hace robusta la estimación usando Kriging, es por esto que lo hace ser un excelente estimador global. Por temas de restricción computacional no se puede hacer las vecindades de tamaño infinito, aunque deberían serlo, pero al menos debemos escogerlas grandes y eso no tiene relación con los alcances de la variografía, por eso no es conceptualmente correcto querer buscar que la variografía se condiga con la vecindad de Kriging, lo que sí debe revisar con rigurosidad son las direcciones de anisotropía.

La validación mediante la metodología Jackknife tiene sentido para muestras gemelas, por ejemplo, sondeos gemelos, en este caso no se presenta debido a que la estimación se hace a lo largo del rumbo del yacimiento por esta razón no representaría mayor relevancia.

La validación cruzada o “*cross-validation*” es una técnica utilizada para evaluar los resultados de un análisis geoestadístico y garantizar que son independientes de la partición entre datos de estimación y prueba, pero esta misma validación la puede hacer Surpac a través de validaciones geométricas y estadísticas.

7.5 MODELO DE BLOQUES

Los modelos digitales del terreno son útiles para el modelamiento de superficie, cuerpos mineralizados, superficies mineras, tajos y excavaciones. Sin embargo estos no describen las características geoeconómicas y demás información que contiene dicho sólido. Por tal razón se hace necesario usar los modelos de bloques, para estimar la distribución de leyes y otras propiedades de la estructura a explotar.

El modelo de bloques consiste en celdas y subceldas que rellenan todo el volumen de interés del yacimiento. Cada celda ocupa un volumen discreto al que se le puede asignar la información que se considere necesaria para describir e interpretar de manera precisa y exacta al yacimiento; se puede evaluar todo el modelo de bloques o cualquier sección de éste y reportar el tonelaje y la ley.

El tamaño de los bloques fue definido de acuerdo a una discusión técnica con el equipo de Minas PazdelRío S.A., sin embargo, se revisaron los parámetros como dimensiones del banco, equipos mineros, mallas de perforación, y además un paso

geoestadístico adicional que corroboran que el tamaño de bloque es ideal como se observa en la Tabla 12. El sub-bloqueo fue generado con el objetivo de minimizar la diferencia entre el sólido geológico y la restricción de bloques, lo que da una buena adherencia y resultados confiables de volúmenes y tonelajes.

Tabla 12. Resumen modelo de Bloques

Tipo	Y	X	Z
Coordenadas Mínimas	1165051.9	1155721.8	2046.5
Coordenadas Máximas	1167351.9	1157161.8	2301.5
Tamaño del Bloque -Usuario	10	10	3
Tamaño de Bloque Mín.	5	5	1.5
Rotación	0	0	0
Recuadros	423391		
Eficiencia Almacenamiento %	98.12		

Los atributos que a continuación se describen en la Tabla 13 son las características de cada bloque, a cada una de las variables a vincular en la estimación (FeO%, SiO₂%, Al₂O₃%, Fe₂O₃%, MgO%, P₂O₅% y LOI%), los cuales son llenadas mediante las técnicas de kriging ordinario y vecino más cercano.

Tabla 13. Descripción de atributos que se asignaron a cada bloque

Descripción del Atributo	Indicador
Distancia anisótropa a la muestra más cercana	Ds_ok_variables
Distancia anisótropa promedio de las muestras	Dn_ok_variables
Varianza de la estimación	Kv_ok_variables
Numero de muestras vinculadas en la estimación	Ns_ok_variables
Paso de estimación	pass_ok_variable
Estimación de Calidad y/o Ley Ordinary Kriging	Ok_variable
Categoría de los recursos	Medido, indicado, inferido
Estimación de Calidad y/o Ley Vecino Cercano	nn_variable
Distancia anisótropa a la muestra más cercana	dn_nn_variable

Figura 23. Vista Isométrica del modelo de bloques, Atributo Litology. en comparación con el modelo geológico.

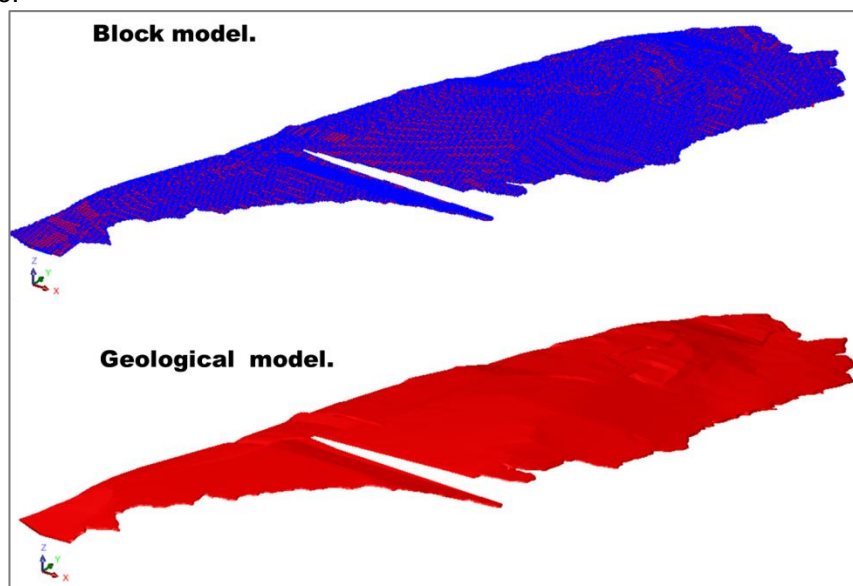


Tabla 14. Desviación entre los volúmenes del modelo geológico y el modelo de bloques.

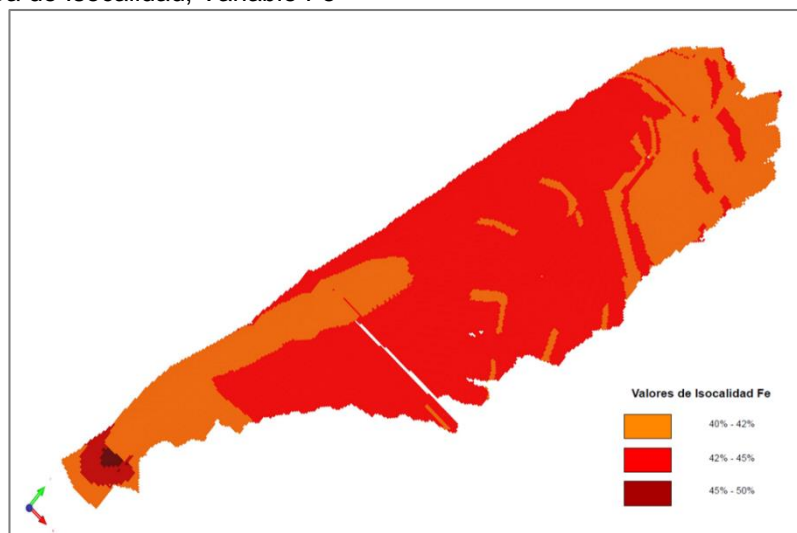
Litología	Volumen modelo de bloques	Volumen solido litológico	Desviación
Hierro	4 012 125	4 003 647	0.99789

La Tabla 14 muestra la desviación entre los volúmenes del modelo de bloques y el modelo del sólido litológico. Este dato permite validar la adherencia definida por los sub-bloques a los sólidos geológicos, diferenciado entre el tamaño de los sub-bloques con la complejidad de la geometría y las dimensiones de los sólidos geológicos. Desviación máxima permisible es 1, por lo que esta desviación es un factor de corrección para la estimación de los recursos.

Cabe resaltar que el resultado presentado en la tabla anterior (Tabla 14) no tiene una relación directa con los volúmenes a reportar en la estimación, debido a que en este caso solo se hace este paso para conocer el porcentaje de adherencia, el cual evidencia que está en 0.997% de desviación lo cual hace que los datos del reporte de estimación van a estar en este rango de desviación. La desviación obedecería a los resultados de los volúmenes calculados y nada interfiere en las cualidades estimadas.

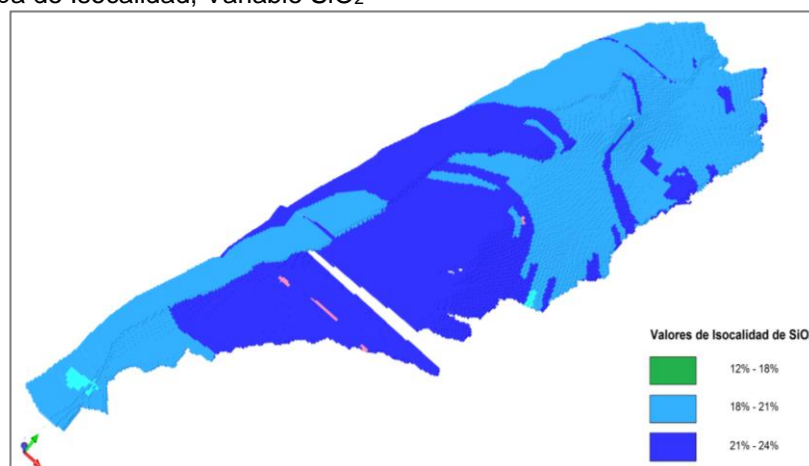
7.5.1 Mapa de Isocalidad.

Figura 24. Mapa de Isocalidad, Variable Fe



Fuente: Autor.

Figura 25. Mapa de Isocalidad, Variable SiO₂



Fuente: Autor.

7.6 ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS.

7.6.1 Estimación por Kriging Ordinario.

La estimación de recursos mediante la metodología del kriging ordinario consiste en interpolar valores de bloques usando kriging con parámetros de un estudio geoestadístico, dicho estudio comprende de una exploración de datos y unas estructuras variográficas que en el numeral 7.4 se encuentra detalladamente relacionado.

7.6.1.1 Estrategia de Estimación.

La estimación de Recursos vincula las variables Fe, SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, las cuales fueron estimadas en 3 pasos de acuerdo a la estructura de las variables anteriormente analizadas. La Tabla 15 presenta la estrategia de estimación que en el modelo de bloques está presente para cada variable el atributo pass_ok_varible.

Tabla 15. Estrategia de estimación.

Pass	Distancia (m)	Búsqueda	Mínimo de muestras	Máxima de muestras
Pass 1	110	Elipse	4	25
Pass 2	220	Elipse	4	25
Pass 3	>220	Elipse	4	25

Fuente: Autor.

7.6.1.2 Clasificación de los Recursos.

Tabla 16. Criterios de Clasificación de los recursos.

Ítem	Proceso	Calificación
Materialidad de los datos	Resultados en físico	Alta
Técnicas de Sondeos Logging	Sondeos y apiques rotativos testificados	Alta
	Nomenclatura y descripción estándar. Descripción del 100 % de los intervalos	Alta
Recuperación de Sondeos Muestreo	85% de Recuperación	Moderado a Alto.
	Muestreo de intervalos de mineralización, cortes por percusión	Moderado
Qa Qc	Programa de Blancos y duplicados. DRP aceptable	Moderado a Alto.
Densidad	Resultados de peso unitario de muestras regulares	Alta
Ubicación de sondeos	Localización con Estación total y levantamiento poligonal.	Alta
Distribución de datos	Dimensiones adecuadas de acuerdo a la dimensión del yacimiento	Alta
Base de datos	Validación QaQC de los datos.	Alta
Interpretación Geológica	La interpretación refleja bien los datos disponibles actualmente.	Alta
Técnica de estimación	Estructura Geoestadístico , Algoritmo Kriging Ordinario	Alta

Fuente: Autor.

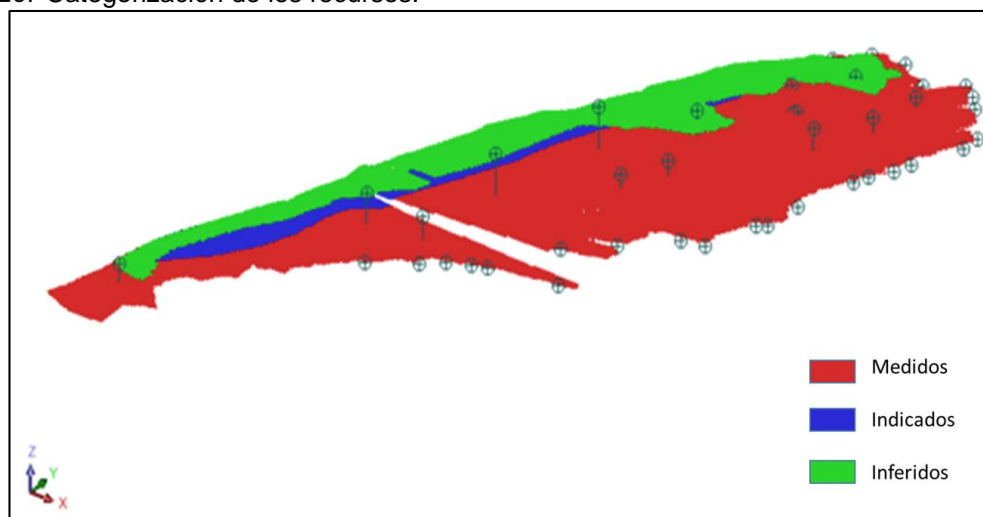
Adicionalmente a los criterios anteriormente mencionados se tiene en cuenta uno muy importante como lo es la variación de Kriging.

Tabla 17. Variación del Kriging.

Variable	
Nº de muestras	33761
Valor mínimo	0.36
Valor máximo	3.50
Media	3.15
Mediana	3.24
Geometric Mean	3.11
Varianza	0.13
Desviación Estándar	0.36
Coeficiente de variación	0.11

La Tabla 17 indica que la media está 3.15, valores inferiores en la estimación podrían considerarse como información muy confiable. Por último, se tiene en cuenta las consideraciones que exponen las Guías Minero Ambientales en cuanto a clasificación y reservas se refiere, también las normas técnicas que considera Minercol, considerando los radios de influencia de los sondeos. Teniendo en cuenta todos estos parámetros se hizo la clasificación de los recursos, el cual se expone en la siguiente gráfica y las siguientes tablas.

Figura 26. Categorización de los recursos.



Fuente: Autor.

7.6.1.3 Reporte de los Recursos OK.

Tabla 18. Recursos minerales de Hierro.

Categoría	Volumen (Mm ³)	Toneladas (MTON)	Variable			
			Fe	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂
Medido	2.47	7.18	44.84	4.92	2.47	18.99
Indicado	0.488	1.41	44.52	4.95	2.45	19.37
Inferido	1.04	3.03	43.2	4.87	0.17	22.5
Total	3.998	11.62	44.75	4.93	2.46	19.1

Fuente: Autor.

7.6.2 Estimación por vecino cercano “Nearest Neighbor”

Se realizó a su vez la estimación de los recursos utilizando el algoritmo del Vecino Cercano el cual consiste en asignar los valores de la muestra a los cubos más cercanos a ella, bien sea definidos por una esfera o por un elipsoide, este método tiende a dar valores más sesgados a medida que los bloques se alejan de la muestra.

7.6.2.1 Reporte de los Recursos NN.

Tabla 19. Recursos minerales de Hierro.

Categoría	Volumen (Mm ³)	Toneladas (MTon)	Variable			
			Fe	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂
Medido	2.48	7.19	44.65	4.96	0.18	19.21
Indicado	0.49	1.42	44.63	4.96	0.18	19.3
Inferido	1.05	3.03	44.41	5.18	0.19	19.23
Total	4.01	11.64	44.61	4.99	0.18	19.27

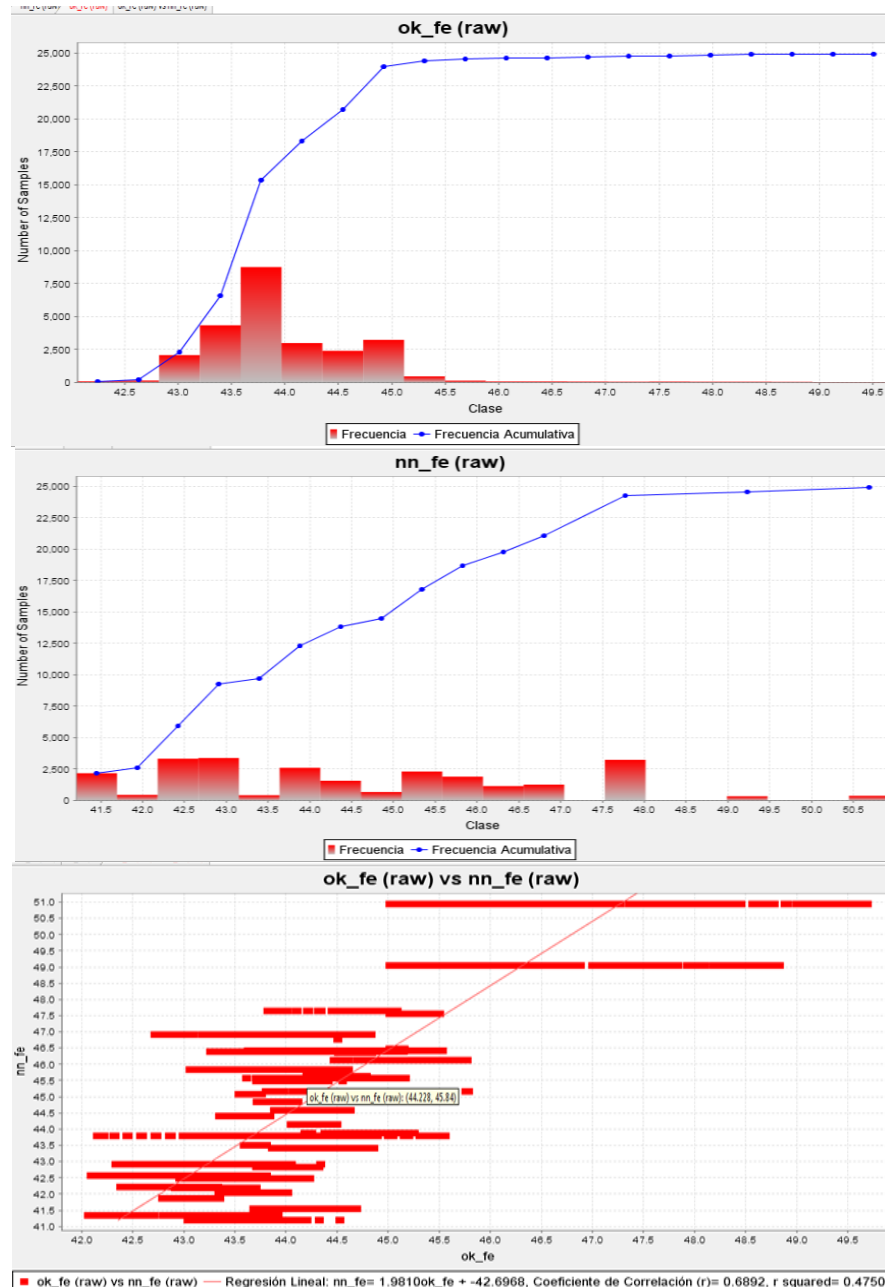
Fuente: Autor.

7.6.2.2 Validación Estimación Nearest Neighbour Vs. Ordinary Kriging.

Tabla 20. Relación estadística entre el Nearest Neighbour y Ordinary Kriging

Estadística	nn_fe	ok_fe
Numero de muestras	24940	24940
Valor mínimo	41.2	42.85
Valor máximo	50.93	49.69
Media	44.52	44.02
Varianza	4.81	0.58
Desv. estándar	2.19	0.76

Gráfica 18. Histogramas y correlacion lineal para el método Ordinary Kriging y Vecino Cercano. Surpac



Fuente: Autor.

La estadística y los histogramas evidencia como se suaviza la estimación de la variable Fe en el Ordinary Kriging y también evidencia que la varianza es mayor en la estimación por NN y los datos de menor porcentaje toman mayor peso. Lo relevante es que la regresión lineal está en $R = 0.68$ positivamente correlacionables y los límites de la estimación son similares.

8 CONCLUSIONES

1. El análisis geoestadístico adaptado a la estimación y categorización de recursos del mineral de hierro de origen sedimentario, empleado en este documento, sirve como metodología general para cualquier otro yacimiento de estas características con un alto grado de confiabilidad.
2. La recopilación de información preliminar (cartografía, resúmenes bibliográficos, bases topográficas etc.) representa la base inicial que permite plantear la fase de exploración directa (líneas de exploración geofísica, sondeos, perforaciones y muestreos) siendo esta la etapa que reúne la información de mayor certeza geológica y de esta manera es necesario que estos procedimientos sean realizados de acuerdo a los patrones y operaciones establecidas.
3. La integración de información exploratoria en bases de datos, es el principio que orienta la geometría del yacimiento y una buena estimación de recursos. Ésta debe ser precisa, concordante, robusta, válida e inherente al área explorada, con el fin de poder hacer un manejo adecuado de la información y proporcionar un alto grado de confiabilidad en la estimación.
4. El resultado obtenido del análisis QA/QC no supera el error permisible del 10% respecto a la diferencia relativa porcentual (DRP) de las muestras originales y duplicados; ni el 2% en el cierre estequiométrico de todas las muestras, indicando, un porcentaje de confianza del 95% de los análisis geoquímicos, suficiente para proceder al análisis exploratorio de datos (AED).
5. El análisis estadístico ó AED es una herramienta indispensable en esta metodología, que busca definir el yacimiento, a partir de la geoquímica obtenida y la cual persigue la definición de familias en donde en este caso separa pisos, como arenisca ferruginosa ($\text{Fe} < 40\%$ y $\text{SiO}_2 > 20\%$) y el banco de mineral de hierro ($\text{Fe} > 40\%$ y $\text{SiO}_2 < 20\%$).
6. El modelo geológico interpretado representa un sistema compresional, afectado por fallas de tipo inverso, manifestado en el comportamiento tectónico regional.
7. La variografía presenta periodicidad (variogramas omnidireccionales) debida a la presencia de estructuras en el área, el mapa variográfico junto con los variogramas directos demuestra poca variabilidad en dirección del rumbo del yacimiento, dada la homogeneidad geoquímica de la variable presentando una anisotropía zonal.

8. La validación variográfica se realiza con herramientas propias del software, el uso de validación Jackknife, es específicamente para muestras o perforaciones gemelas por lo que es ajeno a este tipo de análisis, mientras que la validación cruzada es reemplazable por la validación geométrica y estadística generada con el software.
9. Es importante que la definición de las celdas o subceldas para el modelo de bloques sea el adecuado a usar en el yacimiento, ya que de esto depende la adherencia con el modelo geológico permitiendo precisión en el reporte de los recursos.
10. El yacimiento de hierro (Gohetita) de tipo oolítico, reporta recursos medidos por 7.18MTon, valor obtenido con el Kriging Ordinario, este se encuentra relacionado al proceso geoestadístico y evidencia mayor precisión en los resultados con una varianza de 0.58 (%), con respecto al vecino cercano que presenta una varianza de 4.81(%) y los resultados relacionan un sesgo del 0.01MTon sobre el Kriging.
11. La estimación por Kriging Ordinario es una herramienta que permite agilizar y da confiabilidad a la estimación ya que mide la variabilidad de la misma globalmente, el método del vecino cercano es un estimador confiable en aras de desarrollar proyectos mineros.

9 BIBLIOGRAFÍA

ALFARO S. MARCO A. 2007. Estimación de recursos mineros. Universidad de Chile. Pág. 12-60. Chile

ALVARADO, B.; SARMIENTO, R. 1944. Informe geológico sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la región de Paz de Río, Departamento de Boyacá. Servicio Geológico Nacional., Informe 468, inéd., 132 p. Bogotá.

BONILLA C. COLLIPAL, S. Aplicación de qa/qc en el proceso geológico conducente a la estimación de recursos. Chile. Abril 2013.

BOTERO, G. 1950. Reconocimiento geológico del área comprendida entre los municipios de Belén, Cerinza, Floresta, Nobsa y Santa Rosa de Viterbo, Depto. de Boyacá. Ingeominas, Informe 534; CEGOC, 8:244-311.

CEDIEL, F. 1968. Grupo Girón. Una molasa mesozoica de la cordillera oriental. Servicio Geológico Nacional., Bol. Geol., 16(1-3):5- 96. Bogotá.

CEDIEL, F. 1969. Geología del Macizo de Floresta. 1 Congr. Col. Geol., Mem. :17-29p. Bogotá.

GEMCOM. 2009. Fundamentos de Surpac. Gemcon América latina S.A. Geology And Mine Planing. Santiago de Chile. Providencia.

HUBACH, E. 1957b. Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Inst. Geol. Nal., Informe 1212, 166 p. Bogotá.

HUBACH, E. 1951. Estratigrafía de la sabana de Bogotá y alrededores Boletín Geológico Colombiano. Vol 5.nº2, pag.93-112, Bogotá.

MARÍN. J. 2011. Manual de Minitab 15 (con aplicaciones a las ciencias de la documentación), Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Facultad de Matemáticas. Universidad de Murcia. Murcia

REYES I, (1966). Geología en el sector del ferrocarril entre peñablanca y cosgua. Acerías paz del río. Belencito.

REYES, I. (1984). Geología de la región Duitama - Sogamoso – Paz del Rio. Departamento de Boyacá, Belencito. 54 p.

RENZONI, G. 1962. Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y sureste de Bogotá. Serv. Geol. Nal., Bol. Geol., 10(1-3): 59-79. Bogotá

RENZONI, G. 1981. Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. Ingeominas, Bol. Geol., 24(2):31 - 48, (escrito en 1967). Bogotá.

ULLOA, C. 1985. Hierro oolítico en el norte de Suramérica. 4 Congr. Latinoam. Geol., Trinidad and Tobago. En: CARR B.; CHRISTIAN J. T. (eds.). Trinidad and Tobago Printing & Packing, Pág. 263 – 275.

ULLOA, C. RODRIGUEZ, E Y RODRIGUEZ, G. 2003. Geología de la Plancha 172 Paz del Río. Memoria Explicativa. Ingeominas. Bogotá.

VAN DER HAMMEN, T. 1957. Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental de Colombia). Inst. Geol. Nal., Bol. Geol., 5(2):189-203. Bogotá.